

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Молоштан Дмитро Васильович

УДК 621.318.4

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ ВИРОБНИЦТВА ТА РЕМОНТУ
ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ
З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ

Спеціальність: 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

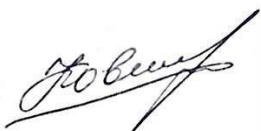
Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів
мають посилання на відповідне джерело



Д. В. Молоштан

Науковий керівник:
Драгобецький Володимир Вячеславович
доктор технічних наук, професор

Ідентичність усіх примірників дисертації засвідчую
учений секретар спеціалізованої вченої ради
Д 26.059.03



С. В. Ковбасенко

Кременчук – 2021

АНОТАЦІЯ

Молоштан Д. В. Удосконалення виробництва та ремонту листових деталей засобів транспорту з метою підвищення ресурсу. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Національний транспортний університет, Міністерство освіти і науки України, Київ, 2021.

Робота присвячена розв’язанню науково-практичного завдання підвищення ресурсу та експлуатаційної надійності листових деталей транспортних засобів завдяки удосконаленню та розвитку конструктивно-технологічного формування для прогнозування життєвого циклу виробу.

Надано аналіз методів підвищення ресурсу та експлуатаційної надійності листових деталей транспортних засобів і чинників, що впливають на життєвий цикл виробу. Визначено, що основними методами поліпшення показників експлуатаційної надійності листових деталей, залежно від їх функціонального призначення, є вдосконалення технології виробництва заготовок (листових, профільних, трубчастих) з використанням інгібіторів корозії унаслідок пластичного деформування прокаткою та профілюванням; удосконалення конструкції деталі та технологій листового штампування, раціональний вибір матеріалів на стадії виробництва та ремонту. Обґрунтовано актуальність досліджень щодо підвищення ресурсу листових деталей транспортних засобів.

Це пов’язано з тим, що на сьогодні моральне та фізичне зношування засобів транспорту України становить 70–80% основних фондів автомобільних і залізних доріг і зі збільшенням обсягу перевезення обумовлено інтенсивною експлуатацією транспортних засобів. Це може призвести до негативних технологічних, економічних і соціально екологічних наслідків.

Виконано вибір напрямів досліджень забезпечення необхідної або оптимальної довговічності та експлуатаційної надійності транспортних засобів, яка забезпечується на всіх етапах виробництва та експлуатації.

На сучасному етапі найбільш ефективним методом проєктування транспортного засобу є метод конструктивно-технологічного формування. Проте цей метод не враховує ієрархічність процесу проєктування, необхідність вибору дієвої стратегії та загального плану виробництва. Окрім того, для створення транспортного засобу необхідний великий «фонд» накопичених знань, «фонд» перспективних досліджень і напрямів розвитку. Тому доцільно метод конструктивно-технологічного формування назвати методом дослідницько-конструктивно-технологічного формування. Це сприятиме розробці науково обґрунтованих методів і методик проєктування та виробництва. Резервом підвищення ресурсу листових деталей транспортних засобів є залучення системного підходу до створення структурно-функціональної моделі конструкції транспортного засобу та цеху листоштампувального виробництва (виробничого або ремонтного) на підставі поняття життєвого циклу виробу від моменту вибору дієвої стратегії до моменту закінчення терміну експлуатації, побудова моделі начального стану деталі, що залучає первинні характеристики та властивості деталі, за якими вона входить до експлуатації. Розроблено класифікацію листових деталей транспортних засобів залежно від виду початкового напівфабрикату та функціонального призначення деталі.

Для визначення найбільш раціонального способу деформування під час правки, рихтування, виготовлення, модернізації кузовних та облицювальних деталей транспортних засобів виконано морфологічний аналіз сучасних технологій листового штампування з урахуванням законів розвитку технічних систем. Найефективнішим є використання безштампових методів формоутворення, універсального технологічного оснащення, використання штампів блочного і пакетного типів та методів зовнішнього рихтування (магнітно-імпульсного та вакуумного) для відновлення деталей без розбирання та лакофарбових покриттів. Якщо рихтування легкових автомобілів потрібне для відновлення їх зовнішнього вигляду, то рихтування корпусних деталей

вантажних автомобілів і залізничних вагонів необхідне для відновлення їх корозійної та зносостійкої міцності.

Для завдання формоутворювальних поверхонь листових деталей під час конструювання та відпрацювання листової деталі на технологічність, максимальну довговічність і коригування (за необхідності) конструкції деталі виконано формалізацію залежностей, що визначають ресурс деталі від параметрів, за якими деталь входить в експлуатацію після штампування та нанесення покриттів та інгібіторів корозії. Розроблена структурна схема методу розрахунку напружено-деформованого і мікроструктурного стану листових деталей після процесу листового штампування (модель технологічного процесу), термообробки (модель технологічних процесів і подальшої експлуатації). До моделей залучені аналітичний, інженерний та чисельний методи розрахунку, у тому числі метод скінчених елементів у програмному пакеті AnSYS/Auto DYN. Розраховано процеси пластичного деформування листових деталей пасажирських вагонів (профіль стінки вагона (ремонтний варіант), вантажних вагонів для перевезення сипучих матеріалів («Кришка люка» (ремонтний варіант)), дуги пасажирських вагонів з максимальним ресурсом експлуатації, ободи коліс вантажних автомобілів.

Розроблено експериментально-аналітичний метод визначення ресурсу ободів коліс транспортних засобів. Найбільшу втомну міцність мають деформовані або зміцнені пластичним деформуванням матеріали до деформацій, що дорівнюють гранично рівномірним. Виконавши випробування зразків з матеріалу ободу колеса на втомну міцність унаслідок деформацій рівнем граничним рівномірним (ε_p) і $0,8 \cdot \varepsilon_p$; $0,6 \cdot \varepsilon_p$; $0,2 \cdot \varepsilon_p$ будуюмо графік залежності числа циклів навантаження N від інтенсивної деформації $N = f(\varepsilon_i)$. Після розрахунку інтенсивності деформації у найбільш деформованій ділянці ободу колеса за залежністю $N = f(\varepsilon_i)$ визначаємо ресурс ободу колеса. Вибір найбільш ефективної схеми напруженого стану для отримання деталей з високою експлуатаційною надійністю здійснюється

напівемпіричним підходом, що заснований на екстраполяції деформації з послідовним навантаженням заготовки.

Відомо, що зі збільшенням наклепу та залишкових напружень у поверхневому шарі корозійна стійкість деталей зменшується унаслідок збільшення пружних деформацій у процесі експлуатації. Облицювальні кузовні деталі та ободи коліс транспортних засобів виготовляються методами листового штампування (згинання, витягування, профілювання, формування та ін.). Серед великого різноманіття способів листового штампування перевага надана тим, у яких деформації та залишкові напруження у поверхневому шарі мінімальні. Також ураховано вплив схеми напруженого стану на розвиток деформацій та запобігання втраті пластичної стійкості унаслідок пластичної деформації: стрічок ковзання, зосередженого потоншення, повторних стрічок ковзання, хвилястості, а також такого дефекту, як «апельсинова кірка».

Наявність таких дефектів сприяє руйнуванню первинної захисної плівки на поверхні деформованого металу. Для визначення впливу схеми деформованого стану на значення інтенсивності деформації та на ресурс листових деталей виконано експериментальні дослідження з використанням матриць з різним співвідношенням півосей еліпсів. Також виконано низку експериментальних досліджень зі штампування листових деталей з елементами жорсткості та профільних заготовок. Надано загальні рекомендації формозміни товстолистових і профільних заготовок для ремонту кузовних деталей транспортних засобів. Обґрунтовано вибір методів штампування та універсального пресового обладнання.

Проведені дослідження можуть бути використані для визначення параметрів процесів зміцнення пластичним деформуванням і отримання кузовних та облицювальних деталей транспортних засобів, двигунів, приладів тощо, моніторингу життєвого циклу деталей машин і агрегатів, що

працюють в умовах зношування знакозмінних навантажень, агресивного впливу середовища на етапах проектування, виробництва та експлуатації.

Ключові слова: ремонт, експлуатація, транспортні засоби, деформування, зношування, корозія.

ANNOTATION

Moloshtan D.V. The improvement of production and repairs sheet parts of vehicles with the purpose of increasing the resource. – Manuscript.

The thesis for candidate of technical sciences degree, specialty 05.22.20 – operation and repair of vehicles. – National Transport University, Ministry of Education and Science of Ukraine, 2021.

The presented work is devoted to solving the scientific and practical problem of increasing the resource and operational reliability of sheet parts of vehicles by improving and developing constructive and technological formation when predicting the method of the product life cycle.

The analysis of methods for increasing the resource and operational reliability of sheet parts of vehicles and factors affecting the life cycle of the product is given. It has been established that the main methods for improving the operational reliability of sheet parts, depending on their functional purpose, are improving the technology for the production of workpieces (sheet, profile, tubular) by using the corrosion inhibitors during the plastic deformation by rolling and profiling; improving the design of the part and sheet stamping technologies, a rational choice of materials at the stage of production and repair. The relevance of the research on increasing the resource of sheet parts of vehicles has been substantiated. This is due to the fact that at present the moral and physical wear and tear of the means of transport in Ukraine is 70-80% of the fixed assets of roads and railways, and an increase in the volume of transportation results in the intensive operation of vehicles. This can lead to the negative technological, economic and socio-environmental consequences.

The choice of the research directions has been made to ensure the necessary or optimal durability and operational reliability of vehicles, which is ensured at all the

stages of production and operation. At the present stage, the most effective method in the design of a vehicle is the method of the constructive and technological formation. But, this method does not take into account the hierarchy of the design process, the need to choose the effective strategy and general production plan. In addition, the creation of a vehicle requires a large “fund” of the accumulated knowledge, the “fund” of promising research and development directions. Therefore, it is advisable to call the method of the constructive-technological formation as the method of research-constructive-technological formation. This will contribute to the development of the scientifically based methods and techniques for the design and manufacture of vehicles. The reserve for increasing the resource of sheet parts of vehicles is attracting a systematic approach to creating a structural and functional model of a vehicle structure and sheet-stamping production (production or repair) based on the concept of a product life cycle from the moment of choosing an effective strategy until the end of the service life. Besides, it is necessary to build a model of the initial state of a part, which includes the initial characteristics and properties of the part for which it is used. A classification of sheet parts of vehicles has been developed depending on the type of the original semi-finished product and the functional purpose of the part.

To determine the most rational method of deformation during straightening, manufacturing, modernization of the body and facing parts of vehicles, a morphological analysis of modern technologies of the sheet stamping has been carried out using the laws of development of the technical systems. The most effective is the use of the stampless stamping methods, universal technological equipment, the use of the block batch dies and external straightening methods (magnetic-pulse and vacuum) to restore parts without disassembling and loading paint coatings. If the straightening of cars is needed to restore their appearance, then the straightening of the body parts of trucks and railway cars is necessary to restore their corrosion and wear resistance.

To set the shaping surfaces of sheet metal parts in the design and working sheet metal parts for manufacturability, maximum durability and adjustments (if necessary) of the part design, the formalization of the dependencies that determine the life of the part on the parameters by which the part is put into operation after stamping and

coating and coating with the corrosion inhibitors has been performed. A block diagram of the method for calculating the stress-strained and microstructural state of sheet parts after the sheet stamping process (a model of the technological process), heat treatment (a model of the technological processes and subsequent operation) has been developed. The analytical, variational, engineering and numerical methods of calculation, including the finite element method AnSYS / Auto DYN are involved in the models. The processes of the plastic deformation of sheet parts of the passenger cars (carriage wall profile (repair version)), freight cars for the transportation of bulk materials - (Manhole cover (repair version)), arcs of passenger cars with the maximum service life, car wheel rims have been calculated.

An experimental-analytical method for determining the resource of the wheels of vehicles has been developed. The stamped sheet parts have the highest fatigue strength, possibly with the subsequent hardening by the plastic deformation of the material with the deformation equal to the extremely uniform. Having performed tests of the samples from the material of the wheel rim for the fatigue strength under the deformations equal to the limiting uniform (ε_p) and $0,8 \cdot \varepsilon_p$; $0,6 \cdot \varepsilon_p$; $0,2 \cdot \varepsilon_p$, we plot the dependence of the number of loading cycles $N = f(\varepsilon_i)$ on the strain rates. Further, after calculating the intensity of the deformation in the most deformed area of the wheel rim, using the obtained dependence $N = f(\varepsilon_i)$, we determine the resource of the wheel rim. The choice of the most effective stress state scheme for obtaining parts with a high operational reliability is carried out by the semi-empirical approach based on the extrapolation of the deformation during the sequential loading of the workpiece.

It is known that with an increase in the work hardening and residual stresses in the surface layer and with an increase in the elastic deformations during operation, the corrosion resistance of parts decreases. The facing body parts and wheel rims of vehicles are made by the sheet stamping methods (bending, stretching, profiling, forming, etc.). Among the wide variety of the sheet stamping methods, the advantage is given to those in which the deformations and residual stresses in the surface layer are minimal. Also, the influence of the stress state scheme on the nature of the

deformation development and prevention of the loss of the plastic stability during plastic deformation is taken into account, i.e. slip bands, concentrated thinning, repeated slip bands, waviness, as well as such a defect as "orange peel".

The presence of such defects contributes to the destruction of the primary protective film on the surface of the deformed metal. To determine the effect of the deformed state scheme on the value of the deformation intensity and on the resource of sheet parts, experimental studies were carried out using dies with the different ratios of the semiaxes of the ellipses. A number of experimental studies have also been carried out on stamping sheet parts with stiffeners and shaped blanks. The general recommendations are provided for shaping thick-sheet and shaped blanks for the repair of the vehicle body parts. The choice of the stamping methods and universal pressing equipment has been justified.

The carried out studies can be used to determine the parameters of the hardening processes by the plastic deformation and to obtain the body and facing parts of vehicles, engines, accessories, etc., to monitor the life cycle of machine parts and units operating under the wear conditions, alternating loads, aggressive environmental influences at the design stages of the production and operation.

Key words: repair, operation, vehicles, deformation, wear, corrosion, fatigue strength.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікація у наукових періодичних виданнях іноземних держав (у іноземному фаховому науковому виданні, що індексується у науково-метричній базі Scopus).

1. Trunina I., Zahorianskyi V., Zahorianska O., Moloshtan D. Ensuring competitiveness of logistics service by selecting the type of storing single-piece cargoes. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*. 2018. Vol. 7, is. 4.3. P. 537–544. (Scopus / Q4 SCImago Journal and Country Rank).

Публікації у наукових фахових виданнях України (у науковому виданні, що індексується у науково-метричній базі Scopus).

2. Zagirnyak M., Zagirnyak V., Moloshtan D., Drahobetskyi V., Shapoval A. A search for technologies implementing a high fighting efficiency of the multilayered elements of military equipment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6/1, no. 102. P. 33–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.183269 (Scopus / фахове видання України, категорія «А» / Q2 SCImago Journal and Country Rank).

3. Драгобецький В. В., Коцюба В. Ю., Молоштан Д. В., Шлык С. В., Наумова Е. А. Технологический мониторинг рабочих поверхностей матриц для импульсной штамповки. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*: зб. наук. праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. № 23 (1299). С. 23–27. (фахове видання України, категорія «В»).

4. Драгобецький В. В., Шлик С. В., Наумова О. О., Кузев І. О., Молоштан Д. В. Математична модель вибуховоударного навантаження зміцнюваних елементів гірничого устаткування. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*: зб. наук. праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. № 12 (1337). С. 20–26. (фахове видання України, категорія «В»).

5. Драгобецький В. В., Щетинін В. Т., Кузев І. О., Молоштан Д. В.,

Наумова О. О. Евристичні прийоми пошуку технічних рішень відновлення деталей з наноструктурних матеріалів. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Вип. 2/2020 (121). С 116–121. DOI: 10.30929/1995-0519.2020.2.116-121. (фахове видання України, категорія «В»).

6. Moloshtan D., Kuzev I., Shlyk S., Shchetynin V. Material saving reserves in sheet stamping production. *Norwegian Journal of development of the International Science*. №56/2021. VOL.1 p. 47-52.

Наукова праця, яка додатково відображає наукові результати дисертації:

7. Молоштан Д. В., Труніна І. М., Черниш Р. О. Аналіз транспортного забезпечення туристичної інфраструктури України. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. – Сєверодонецьк, 2018. № 1 (242). С. 134–138. (фахове видання України, категорія «В»).

Публікації апробаційного характеру.

8. Dragobetskii V., Naumova E., Shapoval A., Shlyk S., Moloshtan D. Improving the Operational Reliability of Stamped Parts of Electrical Engineering. *Machines and Electrical Products. Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019*, P. 506–509. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896532 (Scopus).

9. Dragobetskii V., Nevliudova V., Moloshtan D., Mospan D., Mospan V., Kotsyuba V. Possibilities of the Electric Drive in the Implementation of the Intensifying Factors in the Plastic Deformation of Metals. *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice, PAEP 2020*, № 9240873. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240873

10. Молоштан Д. В., Мосьпан Д. В., Шлик С. В., Драгобецький В. В. Технологический мониторинг сварных соединений тонколистовых деталей при формировании, пластическом деформировании и эксплуатации. *Матеріали XVII міжнародної наукової технічної конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів»*: матеріали конференції. Кременчук: КрНУ,

2018. – С. 194–196.

11. Молоштан Д. В., Труніна І. М., Загорянський В. Г., Загорянська О. Л. Забезпечення конкурентноспроможності логістичних послуг шляхом визначення виду зберігання штучних вантажів. *Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура на транспорті»*, 14 – 16 травня 2018 р.: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 208–209.

12. Драгобецкий В. В., Загорянский В. Г., Шлык С. В., Молоштан Д. В., Шаповал А. А. Напряженное состояние заготовки при двойном перегибе импульсной нагрузкой. *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019*: зб. тез Міжнар. наук.-техн. конференції. Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. С. 84–86.

13. Молоштан Д. В., Наумова Е. А., Кузев І. О., Драгобецкий В. В., Богданов С. А. Жизненный цикл облицовочных деталей транспортных средств при производстве и эксплуатации. *Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту»*. Матеріали конференції – Кременчук: КрНУ, 2020. С. 19–21.

14. Shchetynin V., Arhat R., Drahobetskyi V., Puzyr V., Moloshtan D. Optimization of the combined explosion hardening processes. E3S Web of Conferences 280, 07018 (2021) – Kryvyi Rih, Ukraine, 2021.

15. Щетинин В. Т., Аргат Р. Г., Молоштан Д. В., Драгобецкий В. В., Савенкова Ю.В. Математическая модель восстановительного фрикционного упрочнения деталей горного оборудования. *Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту»*. Матеріали конференції. Кременчук: КрНУ, 2020. С. 21-23.

Свідоцтва на інтелектуальну власність.

16. Ударостійкий бронезахисний шаруватий елемент: пат. 147309 Україна: МПК F41H 5/02 (2006.01). № у 2020 07607; заявл. 30.11.20; опубл. 28.04.21; бюл. № 17.

17. Спосіб гнуття листових деталей: пат. 148165 Україна: МПК B21D 5/02 (2006.01). № у 2021 00439; заявл. 05.02.21; опубл. 14.07.21; бюл. № 28.

ЗМІСТ

	стор
ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1 СТАН ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ ВИРОБНИЦТВА, РЕМОНТУ, ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕСУРСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.	23
1.1 Теоретичні дослідження процесу формозмінювання листових деталей транспортних засобів.	24
1.2 Сучасні технології листового штампування	28
1.3 Вплив технологічних чинників на експлуатаційні характеристики листових деталей транспортних засобів	33
Висновки до розділу 1	36
Мета та завдання дослідження	38
РОЗДІЛ 2 ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	39
2.1 Вибір загальних напрямів досліджень з управління ресурсом облицювальних і кузовних деталей транспортних засобів під час їх виробництва та ремонту	39
2.2 Вибір технологічної схеми формування прямолінійних рифтів листових деталей транспортних засобів	39
2.3 Вибір напрямів експериментальних досліджень	46
2.4 Вибір методів обробки експериментальної інформації	52
2.5 Вибір методів випробування	54
Висновки до розділу 2	56
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РЕМОНТУ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	58
3.1 Класифікація листових деталей транспортних засобів і операцій холодного листового штампування.	58
3.2 Вплив пластичної деформації на ресурс і експлуатаційну властивість листових деталей	63

3.3 Морфологічний аналіз технологій ремонту кузовних і облицювальних деталей наземного транспорту.	70
3.4 Визначення критеріїв оптимізації експлуатаційних параметрів транспортних засобів.	80
3.5 Визначення мінімально можливої інтенсивності та роботи деформацій під час осесиметричного деформування.	81
3.6 Життєвий цикл облицювальних деталей транспортних засобів під час виробництва та експлуатації.	90
3.7 Розрахунок параметрів нових методів ремонту листових деталей транспортних засобів.	94
3.8 Математичне моделювання процесів штампування ремонтних деталей «Лист верхній шкворневої балки» та «Кришка люка».	99
Висновки до розділу 3.	111
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ФОРМОЗМІНЮВАННЯ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ У РЕМОНТНОМУ ВИКОНАННІ.	112
4.1 Експериментальне визначення кінематичних та силових параметрів штампування зразків деталі «Лист верхній шкворневої балки».	112
4.2 Метод визначення експлуатаційної довговічності пластично–деформованих листових деталей.	114
4.3 Визначення переміщень і деформацій під час розгинання полиць на гідравлічному пресі TS0500-6.	116
4.4 Експлуатаційні випробування листових матеріалів.	132
Висновки до розділу 4.	134
РОЗДІЛ 5 УПРОВАДЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВО, ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ.	135
5.1 Метод розрахунку технологічних параметрів отримання деталей з елементом жорсткості послідовним згинанням.	135

5.2 Технологічне оснащення для реалізації запропонованих методів штампування	140
5.3 Результати впровадження у виробництво	142
5.4 Рекомендації щодо правки дисків коліс у процесі експлуатації. .	146
5.4.1 Додаткові рекомендації	154
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	156
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	159
ДОДАТКИ	174

ВСТУП

Актуальність теми. Кузовні деталі належать до основних та найбільш складних і трудомістких у виготовленні елементів конструкції транспортного засобу (наземного, повітряного, морського). Окрім того, кузовні деталі є основою конструкції транспортного засобу, яка об'єднує у силовому аспекті в єдине ціле всі його частини. Ресурс кузова в цілому значною мірою визначає експлуатаційну довговічність наземного транспорту загалом. На ресурс кузовних деталей, які зазвичай виготовленні з листа штампуванням, впливають корозія, експлуатаційні та дорожньо-транспортні пошкодження. Резервом підвищення довговічності кузовних, у тому числі й листових деталей (ресори, ободи коліс та ін.), є комплекс технологічних засобів і раціональний вибір технологічних параметрів процесу їх виготовлення листовим штампуванням.

Забезпечення експлуатаційної довготривалості, ресурсу та надійності транспортних засобів здійснюється у процесі конструктивно-технологічного формування транспортного засобу в цілому, підтримується під час експлуатації та ремонту. Розв'язання цього завдання стосовно облицювальних, кузовних і корпусних деталей транспортних засобів забезпечується з використанням прогресивних науково-обґрунтованих конструкторських заходів та функціонально-орієнтованих технологій. Це досягається завдяки використанню оптимальних форм і розмірів зі швидкозмінними, легкоушкоджуваними елементами необхідної жорсткості та податливості, а також унаслідок зменшення у транспортних засобах динамічних навантажень з використанням сучасних засобів захисту у процесі виробництва і ремонту під час забезпечення умов рівномірності деталей та елементів конструкції; забезпечення ремонтної технологічності конструкцій. Актуальним науково-технічним завданням є зниження трудомісткості всіх видів ремонту; корозійної стійкості деталей транспортних засобів з урахуванням дії навколишнього середовища в процесі експлуатації та зберіганні. Не менш актуальним є своєчасне усунення експлуатаційних пошкоджень кузовних деталей.

У цілому для випуску транспортних засобів з технічно-передовими, високими якостями, економічними показниками необхідно з початку їх проєктування, виробництва та під час ремонту використовувати й розвивати науково-обґрунтований метод конструктивно-технологічного формування.

Важливим та актуальним завданням у виробництві та ремонті листових деталей транспортних засобів на сьогодні є впровадження інноваційних функціонально-орієнтованих технологій та засобів щодо підвищення ресурсу експлуатаційних характеристик і зниження трудомісткості всіх видів ремонту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота проводилася згідно з напрямами наукових шкіл Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського в рамках виконання таких науково-технічних програм: Закон України про пріоритетні напрями науки й техніки в Україні, ст. 7 п. 6 «Новітні технології в енергетиці, промисловості, агропромисловому комплексі»; госпдоговірні роботи: «Розробка технології формозмінювання та проєктування штампа для холодного деформування листа верхньої проміжної балки», № 127/108 – Тмаш–Укрспецвагон», «Удосконалення технології виготовлення листових деталей вигинанням» № 202/10 – Тмаш–Кредмаш, «Удосконалення технології та обладнання для гнуття профільних та листових деталей пасажирських вагонів», № 242/12 – Тмаш–КрВЗ; договір № 359/16-«ТМаш–КрАЗ» на виконання науково-дослідних робіт між Кременчуцьким національним університетом імені Михайла Остроградського та ПАТ «АвтоКрАЗ» «Розрахунок процесу стійкості спеціалізованих броньованих автомобілів КрАЗ «Shrek» та КрАЗ «Fiona» при динамічному вибуховому навантаженні» (Термін виконання: 15.10 – 30.11.2016 р.). Автор брав участь у цих роботах як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – підвищення довговічності листових деталей транспортних засобів з удосконаленням технологій їх виробництва, ремонту і відновлення методами самочинного та послідовного листового штампування й вакуумного рихтування на підставі комплексного моделювання життєвого циклу деталей та їх формоутворення.

Для досягнення поставленої мети визначені та розв'язані такі *завдання*:

- аналіз на всіх етапах виробництва, експлуатації та ремонту листових деталей чинників, що впливають на оптимальну довговічність і надійність транспортних засобів для визначених умов експлуатації, що дозволить визначити актуальний напрям подальшого удосконалення технології листового штампування та метод конструктивно-технологічного формування;

- розробка та обґрунтування методів та заходів підвищення довговічності та експлуатаційної надійності листових деталей транспортних засобів на підстав моніторингу їх життєвого циклу та формалізації залежності параметрів експлуатаційних характеристик від показників деформованого стану та схеми штампування;

- розробка класифікації листових деталей транспортних засобів для формування моделі начального стану деталей та їх функціонального призначення;

- розробка методу прогнозування експлуатаційної довговічності листових деталей транспортних засобів завдяки синтезу математичних моделей начального стану заготовки, технологічних процесів формування, еволюції службових параметрів, зношування деталей, накопичення пошкоджень, відновлюваного ремонту;

- розробка та проєктування менш трудомістких методів ремонту та відновлення листових деталей транспортних засобів;

- розробка та експериментальна перевірка методу розрахунку деформованого стану деталей під час їх штампування, прийнятих припущень та отриманих аналітичних залежностей;

- розробка експериментально аналітичного методу розрахунку експлуатаційної довговічності листових деталей в умовах експлуатаційних навантажень;

- апробація технічних рішень та практичних рекомендацій, що спрямовані на підвищення експлуатаційної надійності листових деталей транспортних засобів та їх ресурсу.

Об'єкт дослідження. Вплив технологічних процесів виготовлення та ремонту листових деталей транспортних засобів на забезпечення їх ресурсних характеристик.

Предмет дослідження. Створення наукових засад і методів розрахунку параметрів та управління ресурсом й технічним станом листових деталей транспортних засобів транспортної техніки на стадії виробництва та ремонту.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження впливу конструктивно-технологічних чинників на зносо- та корозійну стійкість листових деталей транспортних засобів; системний аналіз процесів формування запланованого ресурсу та надійності транспортних засобів на стадіях використання «фонду» накопичених знань визначення стратегії проектування транспортного засобу та технологічних засобів, що реалізують запланований ресурс; морфологічний аналіз і класифікація технологій відновлення та ремонту листових деталей транспортних засобів; експериментально-аналітичне визначення ресурсу деталі на втомну міцність і зносостійкість, чисельне моделювання в процесі виготовлення ремонтних листових деталей та експериментальна перевірка отриманих результатів; комплексне моделювання життєвого циклу листових деталей транспортних засобів, що охоплює моделі: початкового стану матеріалу заготовок, технологічного процесу, еволюції, властивостей матеріалу під час виготовлення деталей, еволюції службових характеристик матеріалу під час експлуатації та ін.

Наукова новизна отриманих результатів:

— удосконалено метод конструктивно-технологічного формування із залученням до методу складових, пов'язані з аналізом фонду накопичених знань та умов експлуатації, що надає можливість від початку створення транспортних засобів забезпечити задані експлуатаційні властивості, якісні та економічні показники;

— удосконалено метод прогнозування ресурсу листових деталей транспортних засобів завдяки синтезу математичних моделей: начального стану заготовки, технологічних процесів виробництва листових деталей та еволюції

властивостей матеріалів під час їх обробки та експлуатації, відновлення та ремонту, що забезпечує зниження витрат на прогнозування ресурсу транспортної техніки;

– уперше розроблено експериментально-аналітичний метод визначення ресурсу листових деталей, що працюють на втомну міцність (ободи коліс, ресори), що дозволяє коректувати технології їх виготовлення та зміцнювання пластичним деформуванням;

– уперше поставлено та розв’язано завдання розрахунку напружено-деформованого стану вм’ятин з рихтуванням їх вакуумом, що дозволяє визначити потрібні силові параметри процесу вакуумного та імпульсно-вакуумного рихтування.

Практичну цінність дисертаційної роботи містять такі її основні результати: визначено ефективні ремонтні технології виготовлення листових деталей пасажирських і вантажних вагонів «Лист верхній шкворневої балки» та «Кришка люка». Розширено технологічні можливості ремонтного обладнання. Надано та апробовано новий спосіб отримання листових деталей з елементами жорсткості («Лист верхній шкворневої балки») з послідовним виконанням вільного вигинання. Обґрунтовано та надано рекомендації щодо визначення технологічних параметрів для штампування листових деталей транспортних засобів. Удосконалено конструкції штампів для формозміни листових деталей з елементами жорсткості під час самочинного вигинання та послідовного формування – витягування. На стадії проєктування технологічних процесів листового штампування листових деталей (облицювальних, кузовних, ободів коліс та ін.) визначено умови формозмінювання з мінімальною інтенсивністю деформацій, що сприяє підвищенню їх корозійної стійкості. Розроблено експериментально-аналітичний метод прогнозування ресурсу листових деталей, що працюють на втомні навантаження (ободи коліс автомобілів і ресори). Створено теоретичну та експериментальну бази для подальшого розвитку методів відновлення облицювальних і кузовних деталей автомобілів та залізничного транспорту. Запропоновано рекомендації щодо вибору

технологічних операцій і зовнішнього та внутрішнього безконтактного вакуумного рихтування облицювальних і кузовних деталей автомобілів залізничного транспорту. Обґрунтовано доцільність рихтування листових деталей кузовів вантажних автомобілів і вагонів. Подано для промислового освоєння рекомендації у вигляді методів розрахунку, залежності для розрахунку параметрів процесу, а також рекомендації з удосконалення технологічних процесів передані для промислового освоєння під час розробки технологічного процесу та інструментального оснащення для штампування листових деталей з елементами жорсткості деталей типу «Накладка» на ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (м. Кременчук), «Кришка люка» на ПрАТ «АвтоКрАЗ» (м. Кременчук), зварних листових деталей контейнерів на ПАТ «Кременчуцький завод металевих виробів» (м. Кременчук), рекомендації з усунення залишкових напружень на ПП «Євротранс-сервіс» і ТОВ «АТП-15307» (м. Кременчук). Результати досліджень упроваджені в навчальний процес у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського для викладання навчальних дисциплін.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем розроблено алгоритм математичного моделювання процесу ударно-абразивного зношування деталей гірничого обладнання [4, 14, 7]; удосконалено математичну модель прогнозування й формування механічних властивостей у технологічних циклах металообробки [2, 3, 10, 13]; визначено залежності для оцінювання деформованого стану заготовки при подвійному згинанні [2, 12]; розроблено алгоритм й методи управління інтенсифікуючи ми факторами при пластичному деформуванні [8, 9, 15]; визначено комплекс варіантів рішення аспектів проблеми при формуванні морфологічної моделі та визначення резервів економії матеріалів при листовому штампуванні [5, 8, 17]; взяв участь у постановці завдання та аналізі процесів транспортного забезпечення [1, 11, 16]; брав безпосередню участь в організації та проведенні експериментів і впровадження розробок у виробництво [15, 17].

Апробація результатів дисертації. Основні концептуальні положення роботи доповідалися автором, обговорювалися та були схвалені на міжнародних науково-технічних конференціях:

- матеріали XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів». Кременчук: КрНУ, 2017;

- Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура на транспорті», 14–16 травня 2018 р. Харків, 2018;

International scientific and practical conference «Prospects for the development of technical sciences in eu countries and ukraine» Wloclawek, Republic of Poland, December 21-22, 2018. Wloclawek: Izdevnieciba «Baltija Publishing»;

Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019»; Збірник тез. Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019;

- 2020 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). Kremenchuk Mykhailo Ostrogradskyi National University, Ukraine, September, 2020.

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 17 наукових працях, з яких: 1 стаття у зарубіжному науковому періодичному виданні, включеному до наукометричної бази Scopus; 1 стаття у фаховому виданні України, віднесеному до категорії «А», Q2 SCImago Journal and Country Rank і включеному до наукометричної бази Scopus; 5 статей у фахових виданнях України, віднесених до категорії «В»; 6 тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях, з яких 2 включені до наукометричної бази Scopus, 2 патенти.

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи – 180 сторінок, у тому числі обсяг основного тексту – 150 сторінок, 42 рисунки, 19 таблиць, список використаних джерел із 126 найменувань і 2 додатків на 6 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СТАН ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ ВИРОБНИЦТВА, РЕМОНТУ, ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕСУРСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Модернізація наявних і проектування нових транспортних заходів виконується з урахуванням потрібного ресурсу експлуатації. Науковець, конструктор, технолог і власник транспортного засобу повинні забезпечити необхідні ресурси транспортного засобу на всіх етапах його створення та експлуатації, тобто фізичний (міжремонтний термін експлуатації), моральний (термін експлуатації до появи нових, більш удосконалених транспортних засобів) і техніко-економічний. Слід зазначити, що межові показники втрати працездатності кузовних, облицювальних і листових деталей ходової складової транспортних засобів суттєво впливають на ресурс та регламентований строк його експлуатації.

У проведеному дослідженні надано аналіз чинників та умов експлуатації листових деталей транспортних засобів, які поділені на такі основні групи:

- абразивне зношування;
- втомна міцність;
- корозійно-механічне та молекулярно-механічне зношування.

Оптимальна довговічність і надійність машин має забезпечуватися на всіх етапах створення машин. До того ж, слід урахувати, що показники довговічності та надійності завжди встановлюються для певних умов експлуатації.

Суттєвий внесок у розвиток теорії та практики науково-обґрунтованих технологічних і експлуатаційних засобів підвищення ресурсу деталей транспортних засобів зробили такі вітчизняні та зарубіжні вчені: Бакалець Д. В., Бутко Т. В., Єлізаветін М. А., Гаврилов Е. В., Гнатов А. В., Гребеніков А. Г., Доля І. К., Дмитриченко М. Ф., Лановий О. Т., Линник І. Е., Поліщук І. П., Посвятенко Е. К., Решетніков Д. Н., Сатель Е. А., Савуляк В. І., Солтус А. П., Enahoro H., Trent N. та інші.

1.1 Теоретичні дослідження процесу формозмінювання листових деталей транспортних засобів

Експлуатаційні властивості листових деталей транспортних засобів значною мірою залежать від виду і способу виготовлення заготовок та їх формоутворення у готові деталі.

Резервом підвищення ресурсу й експлуатаційної надійності листових деталей транспортних засобів є розвиток та наукове обґрунтування методу конструктивно-технологічного формування. Розвиток цього методу не можливий без залучення до нього складової, яка пов'язана з поглибленням фундаментальних досліджень формування функціонально орієнтованих на підвищення ресурсу деталей транспортних засобів на стадії їх виготовлення та ремонту.

У конструкціях різних виробів машинобудування широко використовують деталі типу дахів, стін, окантовок, дверних прорізів, зовнішній контур яких оформляється у вигляді *П*-, *Г*-, *З*-утворюваного профілю. Також існує багато деталей, для надання жорсткості яким використовують рифти (рис. 1.1).

Технологічні процеси листового штампування є постійним джерелом теоретичних та експериментальних завдань, що вимагають розв'язання, на що вказують деталі подані на рис. 1.1.

Аналіз теоретико-експериментальних досліджень в галузі формування елементів жорсткості з прямолінійними рифтами показав, що на сьогодні виконано значний обсяг робіт з аналітичного визначення тиску під час формоутворення прямолінійного рифту, установлення експериментальних залежностей параметра потрібного тиску від відносної глибини рифту та визначення оптимальної геометрії закінцівок рифту.

Оформлення закінцівок рифту здійснюється з використанням жорстких досить складних пуансонів-накладок. Форму рифту вибирають з умови забезпечення однакових умов формування для всіх ділянок рифту, що забезпечується рівномірним тиском, який додається до заготовки, і рівністю радіусів кривизни на циліндричній ділянці рифту і на закінцівці [1].

паралельними, пересічними або радіальними та кільцевими рифтами, з поперечним перерізом прямокутника, напівкруглі та трикутник. У результаті теоретичних і експериментальних досліджень встановлено, що послідовне штампування довгомірного рифту не впливає на кінцеві деформації, порівняно з одноцикловим штампуванням.

Важливі висновки про вплив імпульсного впливу на деформований стан поруч розташованих рифтів. Установлено, що при $\frac{l_1}{B} \geq 3,5 - 4,0$, де l_1 – відстань між рифтами; B – ширина рифту, величина деформацій поруч розташованих рифт не відрізняється, тобто деформація формованого рифту не призводить до зворотної деформації поруч розташованих рифт. На жаль, ці результати не ввійшли до довідкової літератури і не завжди враховуються для конструювання. У цій же роботі побудована номограма для аналізу технологічності конструкції панелей або інших деталей з прямолінійними рифтами.

Теоретичний аналіз процесу формування гофрованих панелей методом вибухового штампування виконаний у роботах В. Ф. Радзівончика [3]. Силкові параметри навантаження визначені методом балансу робіт. При цьому обґрунтовано застосування схеми плоского напружено-деформованого стану. Отримані залежності, коли впливом ступеня та швидкості деформації на опір деформації металу заготовки нехтуємо, можна використовувати для розрахунку деформувальних зусиль під час штампування на гідравлічних і механічних пресах. Слід зазначити, що під час штампування вибухом високі питомі тиски на заготовку зберігаються до кінця процесу формозмінювання. Це дозволяє проводити не тільки формування, але й підчеканення панелей.

Штампування ребер жорсткості та видавок належить до процесів рельєфного формування. Уважають, що рельєфне формування є окремим випадком неглибокого місцевого витягування, за якої матеріал підлягає переважно розтягуванню [4]. У разі місцевого витягування, формування-витягування процес складається з послідовності стадій пластичної деформації вільної ділянки, яка знаходиться між початком радіусів заокруглень пуансона та

матриці: деформації дна опуклості елемента жорсткості та стадії пластичної деформації, суміжного з ребром матриці плоскої ділянки заготовки.

Детальні дослідження з формування прямолінійних рифт провів Е. І. Ісаченков [5]. Потрібний тиск під час формування визначають зі спільного рішення рівняння Лапласа за умовою пластичності для одноосового напруженого стану. Параметри потрібного тиску зіставлені з експериментальними даними щодо формування рифтів зі сталі X18H10T, 20 та алюмінієвих сплавів. Наведені значення граничних тисків руйнування, залежно від відносної глибини рифту та відносного радіуса рифту. У роботі Е. І. Ісаченков указав на неправильний підхід, який встановився в практиці машинобудування, щодо визначення оптимальної геометрії закінцівок прямолінійних рифт. І якщо з моменту виходу монографії Е. І. Ісаченкова 1967 р., яку в практиці машинобудування його рекомендації були відображені, то у вагонобудуванні бюрократичні традиції технологам подолати не вдається. Для виготовлення кришок люків вантажних вагонів досі застосовують так звані веретені подібні плоскі закінцівки. Така форма закінцівок призводить до втрати стійкості зони сполучення закінцівки з площиною іншої частини деталі. Це пов'язано з тим, що різні ділянки рифту мають неоднакові умови деформування. Конструктивно розв'язати проблему сталого формоутворення рифт нескладно. Для цього необхідно в конструкціях застосовувати рифт з геометричними параметрами, які відповідають рифтам «рівного опору деформації». На сьогодні у вагонобудуванні неможливо подолати цей консерватизм і питання втрати стійкості під час штампування такого класу деталей необхідно вирішувати технологам.

Отже, основною проблемою рельєфного формування прямолінійних рифт є втрата стійкості (гофроутворення) за малих пружнопластичних деформацій. Стосовно процесів формоутворення листового матеріалу явище втрати стійкості розкрито досить глибоко й повно в роботах Головльова В. Д., Яковлева С. С., Деля Г. Д. та ін. [6–15].

Явище втрати стійкості під час формоутворення прямолінійних рифтів з

веретеноподібними і плоскими закінцівками майже не розглядалося. Такі завдання зазвичай розв'язують методами чисельного математичного моделювання з використанням принципу можливих змін деформованого стану [16–18].

1.2 Сучасні технології листового штампування

Багатоваріантність технологій та технологічних схем листового штампування потребує визначення технологічних рішень, що забезпечують високі ресурсні характеристики у виробничо-технологічних циклах виготовлення деталей. Особливості технологій обробки металів тиском є багатоваріантність технологічних схем й засобів формозмінювань, які повинні бути спрямовані на підвищення корозійної стійкості, зносостійкості та втомної довготривалості з визначенням технологічних рішень у виробничо-технологічних циклах штампування.

В умовах дрібносерійного виробництва на ремонтних підприємствах вагонобудування виникають значні труднощі формозмінювання довгомірних листових деталей з елементами жорсткості напівкруглої форми («Лист верхній шкворневої балки», «Накладки» та інші). Деталі являють собою профіль з напівкруглою формою гофра товщиною 8 і 10 мм, шириною 170 мм, довжиною не менше 3000 мм і висотою 41 мм. Виготовлення таких деталей можливо на профілезгинальних станах з холоднокатаної вуглецевої сталі звичайної якості [19], двовалкових згинально-формувальних машинах [20], спеціалізованому волочильно-прокатному обладнанні [21, 22], пресовому обладнанні методами формування або послідовного штампування (рис. 1.2).

Технологія виготовлення гнутих профілів на профілезгинальних станах забезпечує можливість отримання раціональної форми з розвиненими елементами поперечного перерізу з відігнутими полками. Застосування гнутих профілів забезпечує економію металу в середньому на 22÷25 % та в деяких випадках усуває механічну обробку, зварювання, клепаання та інші трудомісткі операції. Однак виготовлення малотоннажних партій зігнутих коритоподібних

деталей в умовах ремонтних вагонобудівних, колісних і автомобільних заводів у край небажано через високу вартість комплексу профілів валків, а також необхідність великих виробничих площ.

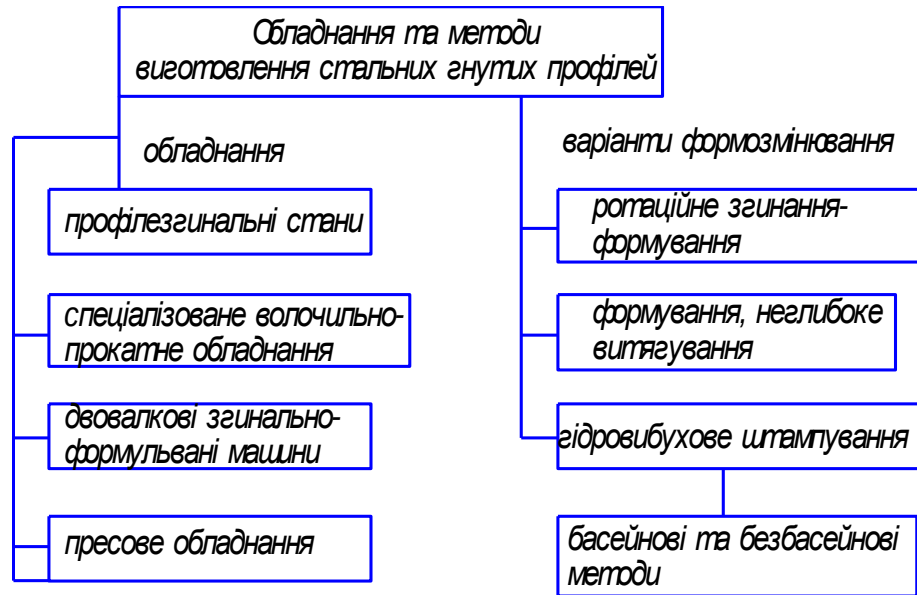


Рисунок 1.2 – Методи та обладнання для виготовлення профілів сталевих зігнутих

Процес поєднання прокатування та волочіння має великі технологічні можливості виготовлення профілів з листових плоских заготовок у холодному стані завдяки осьовому підпору та калібруванню готового профілю. Однак процес на сьогодні апробований для заготовок малої товщини з малопластичних матеріалів. Для задоволення вимог конкретного виду виробництва необхідно створення спеціалізованого обладнання.

Спеціальні двовалкові та багатовалкові згинальні формувальні машини застосовні для формозмінювання холодноштампованих матеріалів товщиною не більше 6 мм.

Пресове обладнання ремонтних вагонобудівних і деяких підприємств, що випускають вантажні вагони не має необхідних розмірів постелі для отримання даних деталей, тому формозмінювання таких деталей здійснюється за елементним штампуванням з диференційованим нагріванням паяльною лампою на гідропресі зусиллям 400 т. Формування елемента жорсткості проводилося на

довжину 600–650 мм за п'ять послідовних переходів. Така технологія трудомістка, а продуктивність надзвичайно низька, навіть в умовах дрібносерійного виробництва.

Для технологічного процесу виготовлення елементів жорсткості особливо перспективне гідровибухове штампування. Отримання таким способом деталей з характерним розміром 3000 мм і більше не викликає ускладнень.

Надалі вибір варіанта технологічного процесу холодного штампування елементів жорсткості (лист верхній) здійснюємо відповідно до алгоритмів [23], рис. 1.3. В умовах підприємства «Укрспецвагон» можливі технології послідовного штампування на гідропресі зусиллям 400 т. Незначні зміни в конструкції деталі та використання замість процесу формування вільного гнуття та розгинання полиць дозволило зменшити зусилля штампування. Використання евристичних та інтуїтивних методів дозволило розробити принципово новий

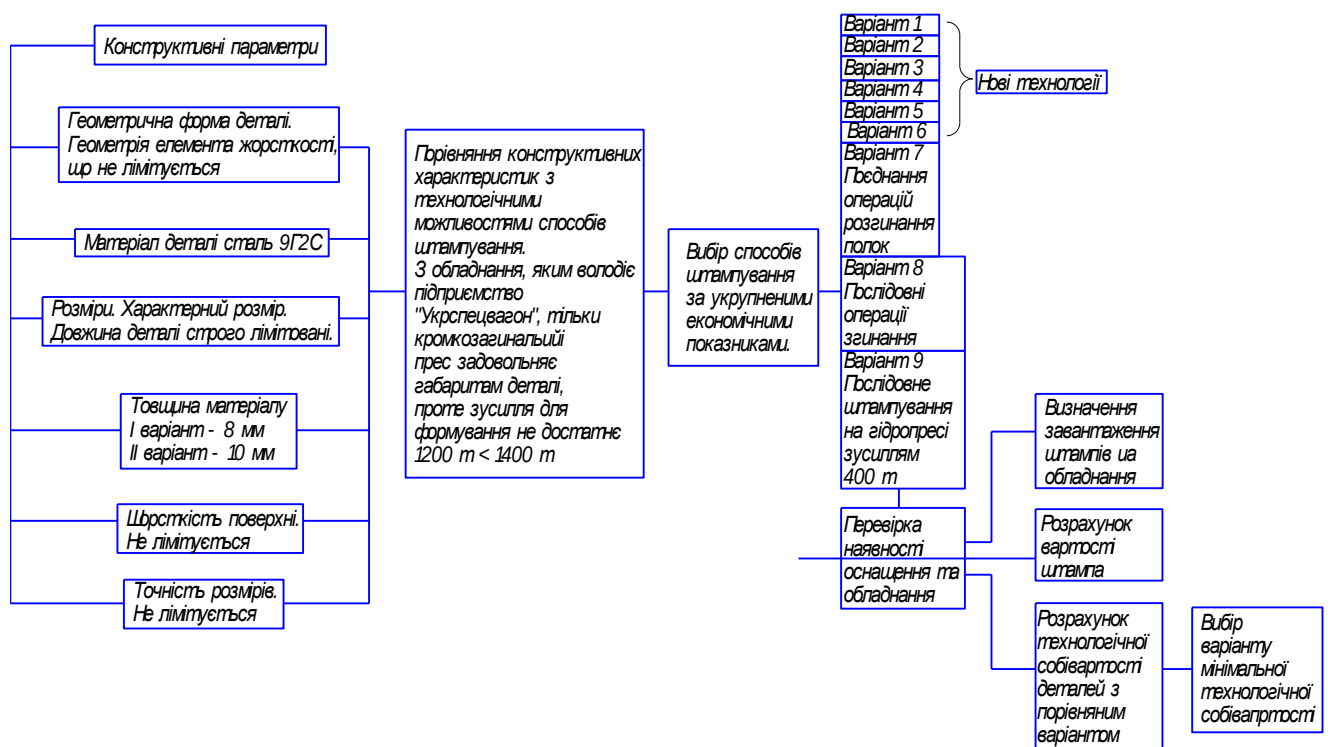
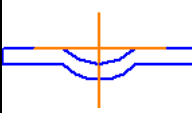


Рисунок 1.3 – Вибір варіанта технологічного процесу

спосіб формозмінювання, що сприяє мінімуму витрат на технологічне оснащення, табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Розрахунок технологічної собівартості деталі

Ескіз деталі	Розміри деталі, мм				Річна програма, шт.	Вартість матеріалу, грн	Зарплата штампувальника, грн	Витрати на експлуатацію та амортизацію штамів, грн	Витрати на обладнання, грн	Технологічна собівартість, грн	
	ширина	довжина	товщина	висота							
	170	3000	8	41	1000	2544	182	78	29,7	2843,7	Послідовне штампування
	170	3000	8	41	1000	2544	39	20	3,2	2616,2	Вільне згинання та розгинання полук
	170	3000	8	41	1000	2544	47	14	3,2	2618,2	Згинання та розгинання полук

Головним чинником економічної ефективності холодноштампувального виробництва є підвищення технологічної ефективності, яка визначається рядом показників, з яких головним є скорочення трудомісткості обробки виробів у результаті скорочення капіталовкладень на придбання обладнання і використання дешевшого технологічного оснащення. Це дозволяє скоротити амортизаційні відрахування на компенсацію зношування обладнання, що знаходиться в експлуатації, і зменшити витрати на технологічне оснащення.

Слід зазначити, що облицювальні деталі транспортних засобів, які підлягають заміні, можливо виготовляти на підприємствах, де їх виробляють. Стосовно кузовних деталей вантажних автомобілів і залізничного транспорту, їх виготовлення у ремонтному варіанті можливо на спеціалізованих підприємствах, оснащених універсальним обладнанням.

Ураховуючи те, що спеціалізовані та ремонтні підприємства не мають достатньо потужного обладнання з можливістю формоутворення заготовок необхідних габаритів проведено аналіз методів формування листових деталей транспортних засобів. Перевагу надано технологіям і технологічному оснащенню, які спрямовані на створення умов для деформування заготовок (рис. 1.4–1.8) під дією реактивних складових, послідовному деформуванню [2] з максимальним використанням пружного розвантаження пресового обладнання та штампа.

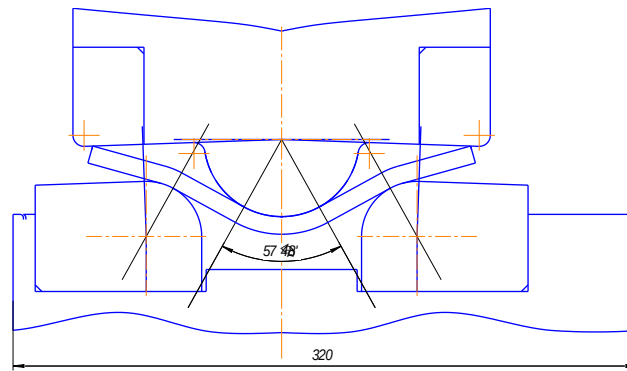


Рисунок 1.4 – Вигинання деталі «Накладка» ступеневим пуансоном.

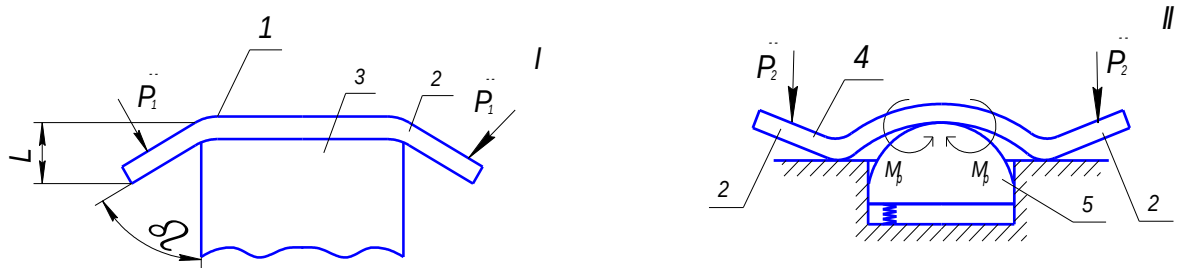


Рисунок 1.5 – Схема самочинної формозміни рифта:

P_1, P_2 – деформувальні зусилля; M_1 – реактивний момент;

1–4 – заготовка та її елементи; 5 – підпружинений пуансон

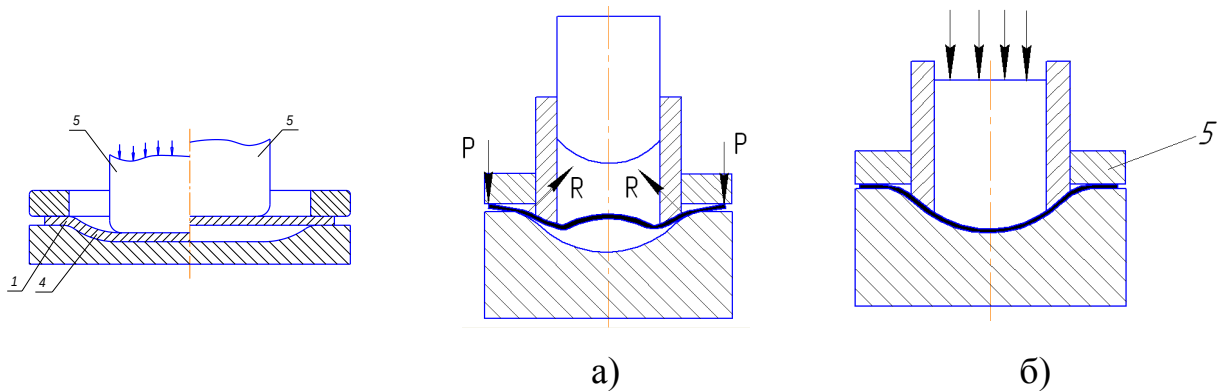


Рисунок 1.6 – Схема
штампування
укороченим пуансоном

а) процес вивертання центральної частини
заготовки під дією реактивного моменту;
б) заключна стадія формоутворення заготовки
Рисунок 1.7 – Послідовність формозмінювання для
одержання деталі необхідної форми поверхні

Значні труднощі пов'язані з розробкою технології виготовлення деталі «Кришка люка», що має вісім поздовжніх рифтів (елементи жорсткості). Існує велика кількість аналогічних деталей у транспортних засобах, що мають елементи жорсткості у вигляді прямолінійних рифтів. Такі деталі виготовляють

методами рельєфного формування, які є частковим випадком неглибокого локального витягування. Виготовлення цих деталей у виробництві транспортних засобів не викликає труднощів. Але у ремонтному варіанті використовують дешевші матеріали. Наприклад, у вагонобудуванні деталь «Кришка люка» сталь 09Г2С заміняють на сталь Ст. 3. Але сталь Ст. 3 майже не зміцнюється під час деформування. Наслідком цього руйнування є закінцівки рифтів і втрати стійкості на плоских ділянках заготовки з виникненням гофрів. Технологи Крюківського вагонобудівного заводу запропонували зварну конструкцію закінцівки, але це не задовольнило Укрзалізницю.

1.3 Вплив технологічних чинників на експлуатаційні характеристики листових деталей транспортних засобів

Для підвищення експлуатаційних характеристик листових деталей необхідно забезпечити їх корозійну стійкість, втомну міцність й зносостійкість. Листові деталі транспортних засобів виготовляють методами пластичного деформування. При цьому у поверхневому шарі заготовки виникає наклеп й залишкові напруження. Підвищення ресурсу листових деталей транспортних засобів неможливо без урахування корозійних пошкоджень, які виникають впродовж їх експлуатації й істотно впливають на міцність та втомну довговічність.

Установлено [24], що зі збільшенням наклепу та залишкових напружень у поверхневому шарі листової деталі корозійна стійкість деталей зменшується. Окрім того, корозійна стійкість зменшується зі збільшенням дії пружних деформацій в умовах експлуатації. Виникнення будь яких утомних тріщин, задирів та дряпин під дією абразивних матеріалів також суттєво зменшує стійкість до корозії листових деталей транспортних засобів. Орієнтація технологій листового штампування та проєктування транспортних засобів з урахуванням необхідності підвищення корозійної стійкості облицювальних і кузовних деталей та деталей ходових частин майже не розглядалася. Типові

корозійні пошкодження листових деталей транспортних засобів подані на рис. 1.8.



Рисунок 1.8 – Технічний стан кузовних деталей транспортних засобів

Чинниками корозії є елементи з найбільшою деформацією (радіуси згинання, локальні потоншення та ін.), а також елементи деталей, що схильні до втрати стійкості, особливо, якщо у процесі деформування виникає «апельсинова шкірка». Значно знищує корозійну стійкість і втомну міцність наявність зварних з'єднань, які є чинниками виникнення залишкових термічних напружень та зон термічного впливу [25]. Суттєво зменшити наявність зварних з'єднань, особливо для виготовлення деталей авіаційних двигунів можливо з використанням технологій імпульсної металообробки (штампування вибухом, електрогідравлічне штампування, гідродинамічне штампування) та процесів гідроформування. Так, на підприємстві «Мотор Січ» під час штампування

деталей газотурбінних двигунів з листових циліндричних і конічних заготовок уникнули застосування десятків метрів зварних з'єднань. Наприклад, для виготовлення складної за формою рельєфної обичайки газотурбінного двигуна, що складається з 8–12 елементів, що зварюються, діаметр завбільшки 1,5 метра на звичайному пресовому обладнанні необхідно 40 м зварних швів.

Під час використання технології вибухового штампування кількість зварних швів зменшено у 10–12 разів. Ураховуючи, що газотурбінні двигуни починають використовувати у бронемашинах і танках, цей напрям є перспективним. Окрім того, з використанням методів листового штампування максимально досягається однорідність деформації. Це сприяє підвищенню надійності та ресурсу листових деталей.

Питання підвищення корозійної стійкості деталей безпосередньо під час пластичної деформації, за винятком робіт Балакіна В. Ф. майже не розглядалося. На сьогодні Балакін В. Ф. розробив технологію підвищення корозійної стійкості труб, яка заснована на сумісному використанні пластичної деформації з використанням інгібіторів корозії [26]. Оскільки багато деталей транспортних засобів зміцнюються методами пластичної деформації, покращення їх експлуатаційних характеристик можливо з використанням цієї технології.

Питання підвищення зносостійкості до втомної міцності листових деталей транспортних засобів достатньо відображено у літературних джерелах [27]. Однак, заходи, щодо підвищення ресурсу листових деталей безпосередньо у технологіях їх виготовлення дотримані у операціях чистового вирубування, пробивання та відрізання. Водночас підвищення втомної міцності та зносостійкості методами поверхневого зміцнення (накатування, дробообробка, зміцнення вибухом та ін.) в той же час призводить до суттєвого зниження корозійної стійкості. Тому наразі необхідне широке впровадження технології сумісного використання інгібіторів корозії з пластичною деформацією.

Окрім того, потрібно визначити співвідношення показників міцності та пластичності, що суттєво впливають на процеси зношування та втомного руйнування.

В цілому на теперішній час методів забезпечення заданих ресурсних характеристик з використанням технологічних засобів залучені наступні [27]: дернування стінок отворів; бар'єрне обтискування листових деталей у зоні отворів; використання інгібіторів корозії при пластичному деформування; використання антикорозійних та корозійнозахистних покриттів. Використання заходів зі зменшення корозії суттєво впливає на втомну міцність листових деталей. Використання антифретінгових покриттів на листових деталях без та з отворами підвищує ресурс деталей у 1,4 – 1,5 разів; дорнування отворів, заклепок, ніпеля, роз'ємних болтових з'єднань та інше. На підставі аналізу теорії й практики процесів виготовлення деталей з листових заготовок сформулюємо цілі та завдання досліджень. Проведений огляд літературних джерел і визначення потреб промисловості дозволив сформулювати мету та завдання досліджень.

Висновки до розділу 1

1. З аналізу літературних джерел встановлено, що особливий інтерес для теорії й практики представляють технології ремонту листових великогабаритних деталей з елементами жорсткості та виробництва цих деталей із забезпеченням заданих ресурсних характеристик. Найбільш ефективними методами отримання таких деталей є методи послідовного штампування з використанням імпульсних джерел енергії, гарячого та листового штампування на гідравлічних пресах зусиллям 50 МН (5000 т) й більше. Однак не всі підприємства мають у своєму розпорядженні це обладнання, тому для забезпечення потреб промисловості в деталях такого класу необхідно вишукати нові функціонально орієнтовані технології формування з теоретико-експериментальним їх обґрунтуванням.

2. Аналіз теоретико-експериментальних досліджень в області формування листових деталей транспортних засобів елементів жорсткості показав, що в даний час виконано значний обсяг робіт з аналітичного визначення тиску унаслідок формоутворення прямолінійного рифту, встановлення експериментальних залежностей параметра потрібного тиску від відносної

глибини рифту та визначення оптимальної геометрії за кінцівок рифт і запобігання перетікання матеріалу між рифтами, розташованих поруч.

Проте залишаються відкритими питання не тільки визначення напруженодеформованого стану для всіх елементів (у тому числі й плоских) штамованої деталі, різнотовщинності її елементів, стійкості процесу формоутворення й вибору раціональних схем деформування, а й питання забезпечення необхідних ресурсних характеристик деталей.

3. В результаті накопиченого досвіду експлуатації транспортних засобів встановлено, що для якісного формоутворення товстолистових деталей з елементами жорсткості, зокрема «Кришка люка», необхідні дослідження зі створення умов штампування, що виключають: локальну втрату стійкості елементів заготовки з утворенням апельсинової кірки, нерівномірності тиску, що прикладається до заготовки; виникнення залишкових деформацій матеріалу заготовки й деформацій, що перевищують гранично рівномірні.

4. При виготовленні листових деталей транспортних засобів з використанням розділових операцій значну увагу слід приділяти усуненню технологічних забруднень у вигляді задирок та мікрочастинок, що виникають під час сколу та викришування. Для запобігання цього доцільно використовувати чистове вирубування, пробивання та відрізання, використовуючи способи утворення високого тиску по контуру отвору. До цих способів залучені способи вирубування ступеневим пуансоном з диференціальним притисканням, реверсивного вирубування та ін.

Мета та завдання дослідження

Мета роботи – підвищення довговічності листових деталей транспортних засобів з удосконаленням технологій їх виробництва, ремонту і відновлення методами самочинного та послідовного листового штампування й вакуумного рихтування на підставі комплексного моделювання життєвого циклу деталей та їх формоутворення.

Для досягнення поставленої мети визначені та розв'язані такі *завдання*:

- проаналізовано на всіх етапах виробництва, експлуатації та ремонту листових деталей чинники, що впливають на оптимальну довговічність і надійність транспортних засобів для визначених умов експлуатації, що дозволить визначити актуальний напрям подальшого удосконалення технології листового штампування та метод конструктивно-технологічного формування;
- науково обґрунтовано та розроблено методи та заходи підвищення довговічності та експлуатаційної надійності листових деталей транспортних засобів на підстав моніторингу їх життєвого циклу та формалізації залежності параметрів експлуатаційних характеристик від показників деформованого стану та схеми штампування;
- розроблено класифікації листових деталей транспортних засобів для формування моделі начального стану деталей та їх функціонального призначення;
- розроблено метод прогнозування експлуатаційної довговічності листових деталей транспортних засобів завдяки синтезу математичних моделей начального стану заготовки, технологічних процесів формування, еволюції службових параметрів, зношування деталей, накопичення пошкоджень, відновлюваного ремонту;
- спроектовано та розроблено менш трудомісткі методи ремонту та відновлення листових деталей транспортних засобів;
- експериментально перевірено розроблений метод розрахунку деформованого стану деталей під час їх штампування, прийнятих припущень та отриманих аналітичних залежностей;
- розроблено експериментально аналітичний метод розрахунку експлуатаційної довговічності листових деталей в умовах циклічного навантаження;
- апробовано технічні рішення та практичні рекомендації, що спрямовані на підвищення експлуатаційної надійності листових деталей транспортних засобів та їх ресурсу.

РОЗДІЛ 2

ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір загальних напрямів досліджень з управління ресурсом облицювальних і кузовних деталей транспортних засобів під час їх виробництва та ремонту

Вибір загальних напрямів досліджень передбачає:

- розроблення нових і вдосконалення наявних науковообґрунтованих стратегій ремонту листових деталей засобів транспорту;
- створення наукових засад і методів розрахунку параметрів та управління ресурсом й технічним станом листових деталей транспортних засобів транспортної техніки на стадії виробництва та ремонту;
- дослідження способів і технологічних процесів ремонту облицювальних деталей транспортної техніки; удосконалення методів, засобів і технологій ремонтних робіт;
- розроблення та впровадження інженерних заходів, засобів і методів ремонту облицювальних деталей транспортної техніки, контролю технічного стану деталей транспортної техніки, закономірностей змінювання параметрів стану в процесі експлуатації, розроблення та впровадження методів, засобів діагностування та прогнозування технічного стану листових деталей, обґрунтування вимог до їх ремонтпридатності й технологічності ремонту.

2.2 Вибір технологічної схеми формування прямолінійних рифтів листових деталей транспортних засобів

Експлуатаційні властивості листових деталей транспортних засобів значною мірою залежать від способів виготовлення заготовок і способів їх формоутворення в готові деталі. Конструктор разом з технологами повинні проводити конструктивно-технологічний аналіз формоутворення листових деталей з виконанням необхідних розрахунків на відповідність експлуатаційним вимогам.

Формоутворення деталей з елементами жорсткості може здійснюватися за двома схемами (рис. 2.1): формуванням або формуванням-витяжкою (рис 2.1 а) та формуванням (гнуттям, обтягуванням) по пуансону (рис. 2.1 б). Для підприємств автомобільної промисловості найбільш придатна схема (рис. 2.1 б) обтягування по пуансону. Стоншення матеріалу в осередку деформації під час формування (рис. 2.1 а) значно більше та охоплює ділянки заготовки більшої протяжності. Унаслідок цього утворення серединної поверхні заготовки на циліндричній частині рифту подовжується на десятки міліметрів [28].

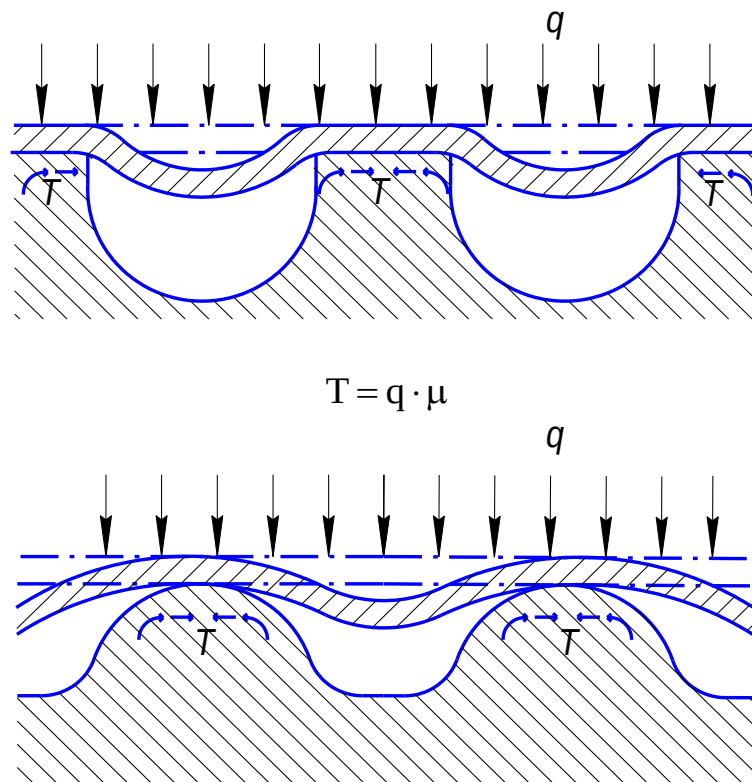


Рисунок 2.1 – Схеми процесів формозмінювання під час штампування рифту по жорсткій матриці (а) та пуансону (б)

У разі обтягування по пуансону на процес деформування переважно впливають поперечні сили, а у разі формування-витяжки – поздовжні. При цьому для забезпечення рівноваги заготовки в першому випадку на внутрішню поверхню заготовки, а в другому – на зовнішню, діють нормальні напруження з боку пуансона або матриці. У разі обтягування по пуансону інтегральна сума

елементарних сил по товщині заготовки, які викликані широтними напруженнями σ_φ , дорівнює нулю.

У другому випадку інтегральна сума дорівнює поздовжній силі:

$$N = \int_r^R \sigma_\varphi dr. \quad (2.1)$$

Окрім того, наявність поздовжньої сили впливає і на величину згинального моменту. За даними [29], зі збільшенням абсолютної величини поздовжньої сили згинальний момент, необхідний для пластичного згинання заготовки, зменшується.

Традиційні методи виготовлення розглянутих деталей вимагають використання потужних пресів.

Розглянемо процес формування окремого рифту в умовах жорсткого защемлення плоскої частини листа. Подовження поперечного перерізу напівкруглого елемента жорсткості можна визначити за різницею довжини дуги рифту і його ширини:

$$\varepsilon_\varphi = \pi - 2. \quad (2.2)$$

Зміна деформацій по товщині заготовки дорівнює:

$$\varepsilon_z = -\varepsilon_\varphi. \quad (2.3)$$

Інтенсивність деформацій:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}}(\pi - 2). \quad (2.4)$$

Окружні напруження, що діють у напівкруглому елементі жорсткості:

$$\sigma_\varphi = \frac{qb}{2s}, \quad (2.5)$$

де q – тиск, що діє на заготовку; b – ширина елемента жорсткості; s – товщина заготовки.

Інтенсивність напружень з урахуванням того, що $\sigma_z = 0$, $\sigma_m = 0$

$$\sigma_i = \sigma_\varphi = \frac{qb}{2s}. \quad (2.6)$$

Інтенсивність деформацій розраховуємо за формулою (2.4) $\varepsilon_i = 1,80$. За діаграмою інтенсивних напружень для Ст. 3 знаходимо $\sigma_i = 300,0 \text{ МПа}$. За залежністю (2.6) знаходимо тиск q , відповідний прогину $h = \frac{b}{2}$. Зусилля формування погонного метра рифту складе:

$$P_f = qS_p = \frac{2s \cdot \sigma_i}{b} \cdot \pi b \cdot 1 = 2\pi s \cdot \sigma_i, \quad (2.7)$$

де S_p – площа поверхні рифту.

Величина роботи деформування погонного метра рифту:

$$W = P_f \cdot b = 2\pi s b \cdot \sigma_i. \quad (2.8)$$

У разі обтягування по пуансону деформації розраховують за умовою збереження довжини окружності:

$$\varepsilon_\varphi = -\varepsilon_r = \ln \frac{r}{r_0} = \ln \frac{r}{\sqrt{r_0 \cdot (r_0 + s)}}, \quad (2.9)$$

де r – радіус заготовки в кінцевий момент деформування; r_0 – початковий радіус заготовки.

Уважаємо, що поворот перетинів у процесі згинання здійснюється відносно шару, з яким збігається нейтральна поверхня в кінцевий момент деформування. Окрім того, унаслідок згинання довжина шару по нейтральній поверхні в кінцевий момент деформування залишається незмінною. Величину відносної лінійної деформації можна визначити зі співвідношення:

$$\varepsilon_\varphi = -\varepsilon_r = \frac{r}{\sqrt{r_0(r_0 + s)}} - 1. \quad (2.10)$$

Її максимальне значення складе:

$$\varepsilon_{\varphi \max} = \sqrt{\frac{r_0 + s}{r_0}} - 1 = \sqrt{1 + \frac{s}{r_0}} - 1 \approx 1 + \frac{s}{2r_0} - 1 \approx \frac{s}{2r_0}. \quad (2.11)$$

Середнє значення лінійної деформації складе $\varepsilon_\varphi = \frac{s}{r_0}$.

Інтенсивність деформацій під час обтягуванні буде дорівнювати:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{s}{r_0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{s}{b-t}. \quad (2.12)$$

Значення моменту визначаємо за залежністю:

$$M = \frac{1}{4} \sigma_i \cdot s^2 = P \cdot \frac{b}{2}. \quad (2.13)$$

Точніше його значення відповідає виразу:

$$M = \frac{bs^2}{6} (1,5 + \varepsilon_i) \sigma_i, \quad (2.14)$$

де σ_i – напруження плинності, яке визначають за діаграмою справжніх напружень; ε_i – ступінь деформації крайніх волокон під час обтягування.

Потім за залежністю (2.11) розраховуємо інтенсивність деформацій та за аналогією зі згаданим раніше визначаємо інтенсивність напружень. Енергія деформації унаслідок чистого згинання складе:

$$W_d = \frac{1}{2} \sigma_i \cdot s^2 \cdot P \cdot b, \quad (2.15)$$

де P – зусилля обтягування.

Розрахунок роботи деформації можна зробити і на підставі класичної теорії деформованості матеріалів [30]. Для формування елемента жорсткості, нехтуючи пружними деформаціями, умову сталості обсягу може бути записано у вигляді:

$$d\varepsilon_r = -d\varepsilon_z. \quad (2.16)$$

Умова збігання головних осей напружень і деформацій та сталості величини головних нормальних напружень має вигляд:

$$\frac{-\sigma_z}{\sigma_\varphi - \sigma_z} = \frac{-d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\varphi - d\varepsilon_z} = \frac{\sigma_\varphi}{\sigma_z} = -\frac{d\varepsilon_\varphi}{d\varepsilon_z} = -1. \quad (2.17)$$

Якщо прийняти, що деформації за товщиною постійні, то збільшення деформацій можна визначити з виразів:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_z &= \frac{ds}{s}; \\ d\varepsilon_\varphi &= \frac{dr}{r}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Рівняння рівноваги для формування циліндричного рифту приводиться до вигляду

$$\frac{d\sigma_\varphi}{\sigma_\varphi} = \frac{ds}{s} d\varphi, \quad (2.19)$$

де φ – кут згинання.

Враховуємо, що $\sigma_\varphi = -\sigma_s$, φ змінюється від 0 до π , а товщина заготовки – від s_0 до $2s_0/\pi$. З огляду на те, що при $s = s_0/2$ $\sigma_z = q$ (q – тиск, необхідний для формування елемента жорсткості), отримаємо тиск формування, що дорівнює:

$$q = \sigma_z \cdot \pi \cdot \ln \frac{2}{\pi}. \quad (2.20)$$

Середня величина роботи пластичної деформації під час формування складе для одиничної довжини:

$$W_f = q \cdot 2b \cdot b = 2b^2 \cdot \sigma_z \cdot \pi \cdot \ln \frac{2}{\pi} \approx 4b^2 \sigma_z. \quad (2.21)$$

Під час обтягування:

$$W_b = 0,25 \cdot \pi \cdot \sigma_s \cdot s^2 = 0,785 s^2 \sigma_s. \quad (2.22)$$

При $b = 5s$ робота деформації під час обтягуванні в 1,3 раза менша, ніж під час формування. Зменшення роботи деформації у тому числі зменшує деформації та наклеп матеріалу, тому така технологічна схема більш орієнтована на підвищення ресурсу листових деталей транспортних засобів.

Наступна методика визначення енергії пластичної деформації ґрунтується на феноменологічній теорії деформованих матеріалів. Скористаємося діаграмою справжніх напружень Ст. 3 та діаграмами пластичності та стійкості, наведеними в роботі [31–33].

Питому енергію, яка витрачена на пластичну деформацію, визначають з виразу:

$$W = A \int_0^{\varepsilon_i} \varepsilon_i d\varepsilon_n, \quad (2.23)$$

де A – коефіцієнт, чисельно рівний інтенсивності напружень (при $\varepsilon_i = 1$ $A=1000$ МПа); ε_i – ступінь деформації; n – критичний ступінь деформації в момент утворення шийки (при $\varepsilon_i = 1$ для Ст. 3 $n = 0,315$).

Під час формування показник схеми напруженого стану дорівнює:

$$\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_u} = 0, \quad (2.24)$$

де σ_1, σ_3 – головні напруження.

У цьому випадку $\varepsilon_i = 0,7$. У разі чистого вигинання $\eta = 1$, $\varepsilon_i = 0,5$. За цією методикою співвідношення питомих робіт (а оскільки обсяг деформованого елемента однаковий, то і повних робіт пластичної деформації елемента жорсткості) складе:

$$\frac{1000 \int_0^{0,57} 0,7^{0,315} d\varepsilon_p}{\frac{1}{k-1}} = \frac{509,4}{803,9} \approx 0,63(k-1), \quad (2.25)$$

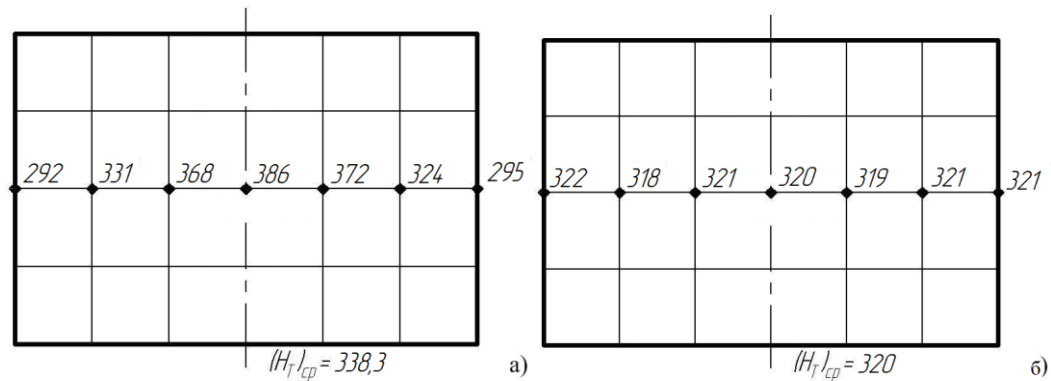
$$1000 \int_0^{0,5} 0,5^{0,315} d\varepsilon_p \quad k-1$$

де k – відношення ширини елемента жорсткості b до товщини заготовки s .

При відношенні b/s , що дорівнює 5, робота деформації під час обтягування в 2,53 раза менша, ніж під час формування. При $b/s=10$ – в 5,7 раз. При ширині елемента жорсткості, що дорівнює $2,58s$, роботи деформації під час обтягування та формування однакові.

З огляду на те, що найбільшу точність і достовірність у визначенні роботи пластичного деформування листових заготовок забезпечує метод твердості, його теж слід використовувати для зіставлення енергетичних витрат під час формування та обтягування. На рис. 2.2 подано результати вимірювання твердості в поперечному перерізі циліндричного елемента жорсткості під час

формування та обтягування. Розрахунок роботи пластичного деформування з розподілу твердості проводився за методикою, викладеною в роботі [32] з використанням наведених там же тарувальних графіків.



а – під час формування; б – під час обтягування

Рисунок 2.2 – Результати вимірювання твердості

Середня питома потенційна енергія щодо залежності твердості від питомої потенційної енергії деформування Ст. 3 з товщиною листа 5 мм [34] складала під час формування $W_f = 700$ Дж / см³, під час чистого вигинання – 15 Дж/см³.

Отже, енергетичні витрати при виготовленні цього класу деталей методом обтягування як мінімум в 1,5 раза менші, ніж під час формування, це ж стосується зниження деформацій, наклепування й більш однорідного деформованого стану. Тому ця технологічна схема найбільш функціонально орієнтована на збільшення ресурсу листових деталей транспортних засобів. Функціональна орієнтація технології виготовлення листових деталей транспортних засобів націлена на надання переваги технології обтягування вільного вигинання послідовного штампування, імпульсним методам металообробки та інше.

2.3 Вибір напрямів експериментальних досліджень

Для перевірки достовірності теоретичного аналізу різних стадій процесу виготовлення виробів з листових матеріалів і кількісного оцінювання технологічних параметрів напруженодеформованого стану заготовки, що

суттєво впливають на ресурс листових деталей, виконано вибір напрямів експериментальних досліджень.

Достовірність аналітичних методів може бути оцінена також з використанням чисельних методів розв'язання задач обробки металів тиском. Однак їх висока ефективність у розв'язанні конкретних завдань не виключає необхідності застосування експериментальних методів для дослідження практичних завдань. Сучасні дослідницькі завдання в галузі листового штампування, формування, витягування-формування зазвичай пов'язані з визначенням напруженодеформованого стану деталей складної геометричної форми.

Широко використовувані інженерно-дослідні комплекси, такі як, наприклад, ANSYS, Visual Nastran Desktop 4D, ADAMS [34–36] та інші, формально дозволяють урахувати майже будь-які наявні робочі навантаження та граничні умови, а також теоретичні моделі їх опису. Реалізована складність комп'ютерної моделі технологічного процесу та кількість урахованих фізичних чинників під час проведення досліджень обмежується переважно лише обсягом часу, необхідного для розробки моделі та розрахунку.

Однак на практиці можливості цих систем у повному обсязі реалізувати не вдається через різні причини. Як показує практика, для цих систем характерна висока трудомісткість побудови моделі. Найчастіше, щоб побудувати адекватну досліджуваному процесу модель, потрібна участь великої кількості фахівців. Проведення експериментів на математичних моделях, у зазначених системах, вимагає залучення значних обчислювальних ресурсів. І, нарешті, важливий той факт, що ці системи мають комерційний статус і, отже, виникає необхідність розв'язувати нетривіальне завдання оцінювання економічної ефективності застосування цих додатків в умовах невизначеності про кількість та якість майбутніх результатів моделювання.

Тому для створення моделі досліджуваного процесу дослідник змушений приймати різні, що впливають з постановки завдання, спрощення моделі або приймати будь-які припущення [37].

Значення експерименту, як показує практика, є визначальним в остаточних висновках про ступінь достовірності отриманих результатів. При цьому сам процес планування, підготовки та проведення експерименту, а також аналізу отриманих під час його виконання даних, є досить трудомістким [38].

Для дослідження технологічних процесів формування та витягування формування визначення параметрів, що впливають на ресурс деталей, найбільш інформативними є дослідження полів напружень і деформацій.

Експериментальне дослідження поля напружень і деформацій дозволяє, на підставі вивчення векторного поля переміщень точок досліджуваного зразка, зробити достовірні висновки про розподіл напружень та деформацій в тілі, що підлягає деформації та можливості перенесення отриманої інформації на натурний зразок. Знаючи особливості розподілу компонент тензора напружень і деформацій, можна оцінити вплив технологічних елементів керування напруженодеформованим станом на якість готового виробу, визначити енергосилові параметри модельованого технологічного процесу і спрогнозувати ресурс отриманої листової деталі.

На сьогодні при вимірювання деформацій твердого тіла застосовують різні методи, які постійно розвиваються відповідно до вимог сучасних завдань та які розрізняються за рівнем складності підготовки і проведення досліджень та апаратурою, що застосовується, особливостями взаємодії та допустимими матеріалами зразка, чутливістю, статистичною та апаратурною точністю та іншими параметрами.

Для розробки методики проведення експерименту та способу обробки експериментальних даних був проведений порівняльний аналіз методів, найбільш поширених у практиці досліджень. Були враховані такі характеристики, як галузь застосування, трудомісткість методу, використання спеціальної апаратури, складність математичної обробки, простота інтерпретації отриманих експериментальних даних та ін.

Тензометрія. Це група методів для вимірювання бази первинного перетворювача, який деформується спільно з досліджуваною моделлю [39]. Як

первинні перетворювачі можуть використовувати різні датчики: ємкісні, оптичні, п'єзоелектричні, індуктивні і т. д. Зазвичай ці датчики застосовують для вимірювання деформацій або напружень в локально навантажених місцях конструкції або зразка, наприклад для дослідження концентраторів напружень. Застосування їх для вивчення загальної картини деформування під час дослідження технологічних процесів формування проблематично та вимагає нетривіальних рішень у розробці та організації експерименту.

Для дослідження технологічних процесів обробки металів тиском, і зокрема процесів формування, електротензометрія найбільш поширена. На сьогодні доступна довга лінійка тензорезисторів різного виконання та з широким діапазоном параметрів. До переваг тензометрії слід віднести можливість обробки даних у реальному часі, передавання на великі відстані на пристрій обробки, високу чутливість та роздільну здатність, низьку інерційність, високу стабільність параметрів та ін.

Найбільшого застосування набули тензодатчики з базою 1–20 мм. За довжиною бази тензодатчики умовно поділяють на три групи: з малою (до 5 мм), середньою (5–30 мм) і великою (понад 30 мм) базами. Окрім дротяних, широко застосовують напівпровідникові та фольгові тензодатчики.

Вибір бази тензодатчика визначає характерний розмір ділянки вимірювань, у межах якої відбувається осереднення досліджуваної величини або параметра.

Серед недоліків тензометрування – необхідність тарирування датчиків, а також залежність сигналу з датчика від температури та якості монтажу. Суттєвим недоліком тензодатчиків під час дослідження процесів пластичного формозмінювання є те, що вони є одноразовими [40]. Це призводить до суттєвого збільшення трудомісткості експерименту і в багатьох випадках є визначальним.

Голографічні інтерференційні методи вимірювання дозволяють безконтактно визначати поля переміщень і деформацій поверхні експериментального зразка. Переміщення точок поверхні досліджуваного зразка

визначають за вимірюваннями оптичної різниці ходу інтерферувальних хвиль, яка може бути пов'язана зі зміною форми або положення досліджуваного об'єкта в просторі, довжини інтерферувальних хвиль та інших параметрів.

Недоліками цих методів є громіздкість і висока ціна експериментальних установок, а також відносна складність інтерпретації отриманих даних. Застосування цього методу в виробничих умовах обмежено впливом перешкод, обумовлених вібрацією елементів вимірювального комплексу.

Серед інших методів визначимо поляризаційно-оптичний метод, метод крихких покриттів і ультразвуковий метод визначення напружень, які не набули широкого застосування під час вивчення технологічних процесів гнуття, формування, витягування-формування. Ці методи вимагають застосування спеціальних матеріалів і спеціального обладнання.

Оптико-геометричні методи. До них належать метод ділільних сіток, метод муарових смуг, дзеркально-оптичний та наближений до них метод вимірювання твердості. Ця група методів безконтактним способом вивчає спотворення (деформації) базового геометричного елемента, який наносять або проєктують на досліджуваний об'єкт.

Метод вимірювання переміщень або деформацій з використанням ефекту муару передбачає наявність двох растрів: базового та пов'язаного з поверхнею заготовки, яка відчуває деформації. Основною проблемою для отримання смуг муару є проблема поєднання растрів, яка має складне розв'язання у разі дослідження кінцевих пластичних деформацій.

Порівняльний аналіз різних способів вимірювання деформацій показав, що найбільшого поширення набули методи ділільних сіток і метод вимірювання твердості, які дають можливість визначити деформований, а за ним і напружений стан тіла. Обидва метода мають єдину методологію обробки результатів вимірювань.

Метод ділільних сіток є найпростішим серед оптичних методів. У ньому на досліджувану поверхню наносять систему точок, ліній або інших міток, зміна

взаємного розташування та конфігурації яких дозволяє визначити переміщення, деформації, швидкості та інші досліджувані величини.

Метод сіток надає дискретну інформацію, база його задається відстанню між сусідніми лініями – кроком сітки. Уважають, що перевага методу полягає в простоті його реалізації та використовуваної апаратури, недолік – порівняно невисока точність визначення величин, необхідність нанесення сіток на різні поверхні вимагає різних підходів і спеціального інструменту.

Однак досягнення сучасних інформаційних технологій суттєво спрощують реєстрацію та обробку даних і підвищують точність визначення досліджуваних величин. Тому в роботі для дослідження напруженодеформованого стану елементів заготовки в технологічних процесах формування та із застосуванням керуючих елементів був застосований метод ділильних сіток.

Мета експериментальних досліджень:

- вивчення тензорних полів напружень і деформацій фізичної моделі, деформованої на експериментальному оснащенні, та оцінювання помилки визначення напружень і деформацій;

- визначення граничних параметрів напруженодеформованого стану та відповідних цьому граничному стану параметрів технологічного процесу, що гарантують відсутність бракувальних ознак на готовому виробі.

Кероване деформування заготовки реалізовувалося завдяки створенню на ній ділянок, що обмежують течію металу за певними напрямками. Як елементи керування застосовувалися тиск притискування, геометрія пуансона.

Операцію формування елементів рельєфу на пологих формоутворювальних деталях застосовують для виробництва широкої номенклатури виробів відповідного призначення. Її також застосовують для отримання виступів під точкове та рельєфне зварювання або для отримання більш глибоких рельєфів. Тому вивчення поля переміщення матеріальних точок плоскої частини заготовки становить значний інтерес для дослідження, оскільки на його підставі визначають параметри напруженодеформованого стану та параметри технологічного процесу. Стосовно визначення неоднорідності

деформації, останню можливо розрахувати. Слід урахувати, що неоднорідність деформації – це верхня оцінка усередненої деформації за об'ємом осередку деформації.

2.4 Вибір методів обробки експериментальної інформації

Результати експериментальних досліджень у деяких випадках не можуть безпосередньо використовуватися для аналізу кінематики процесу формозмінювання та напруженодеформованого стану заготовки. Тому виникає необхідність додаткової обробки результатів вимірювань. Це пов'язано з проблемами інтерполяції, диференціювання та інтегрування чисельних значень. Найбільшого поширення для обробки дослідних даних набули графічні способи, засновані на геометричних побудовах і вимірах. Більш досконалі графоаналітичні способи пов'язані з поєднанням нескладних графічних побудов і математичних операцій. У сучасних умовах доцільно використовувати комбіновані способи обробки: експериментально-графічний, експериментально-аналітичний та експериментально-графоаналітичний. Для зменшення обчислювальних похибок після вимірювання координат матеріальних точок (для плоскої деформації) у деформованому стані слід визначити переміщення, а швидкості переміщень зображувати функцією перших і вищих похідних переміщень. При цьому в більшості аналітичних методів обробки градієнти переміщень апроксимуються поліномами n -ого ступеня (рядами Фур'є, Чебишева, сплайнами) [41], у дослідженні функцією двох змінних $U_i(a_1, a_2)$, де U_i , градієнти переміщень для стаціонарного процесу в умовах плоского деформованого стану. Підхід аналітичного чисельного аналізу полягає в тому, щоб використовувати вузлові точки координатної сітки для отримання наближеної функції або рішення, а потім виконати аналітичну операцію. Відбувається так звана «аналітична заміна». Суть цього полягає в тому, що функцію, яку неможливо обробити, замінюють іншою, з якою вже можливо виконувати необхідні операції. Наприклад, для обробки експериментальних даних, отриманих методом координатних сіток функцій, задається таблицями їх

значень деякої безлічі значень x_p . Для розв'язання таких завдань можна скористатися способами інтерполяції багаточленами, чисельного диференціювання, побудови ліній ковзання, локальної апроксимації дослідних даних. Ці способи обробки даних є досить перспективними, але всі вони вимагають попереднього аналізу дослідних даних для того, щоб коректно вибрати відповідні функції переміщень. Окрім того, розглянуті методи надають можливість визначати переміщення (іноді їх часткові похідні), різницю деформацій у вигляді первинної експериментальної інформації. Однак для обчислення інших кінематичних параметрів деформацій, швидкостей деформацій та швидкостей переміщень, які дозволяють експериментально-аналітичними методами розв'язати завдання пластичного деформування остаточно, похибки апроксимації та згладжування залежать від типу апроксимувального полінома (базисних функцій), кількості та розташування опорних точок, кроку згладжування і т. д. Розглянуті аналітичні методи та залежності, що не пов'язані з фізичною суттю процесу формо змінювання, і не завжди точність даних, отриманих експериментально, які потім апроксимуються та згладжуються, можна використовувати для теоретичного аналізу. Більш прийнятно для розрахунків напруженодеформованого стану скористатися методом скінченних елементів (МСЕ). У цьому методі об'єднані механіка суцільних середовищ, зокрема теорія пластичності та сучасні методи чисельного аналізу. Зручність застосування методу скінченних елементів пов'язана і з тим, що і в методі координатних сіток, і в МСЕ ділянку, яка підлягає дискретизації, поділяють на прямокутні підгалузі. У МСЕ варійовані параметри мають чіткий фізичний зміст як значення функцій у вузлах скінченноелементної сітки, що згладжує значення у вузлах координатної сітки.

На сьогодні теорії пластичності поділяють на дві групи [42]. У першій групі теорій, які називаються деформаційними, установлюється зв'язок між напруженнями та деформаціями. У другій групі розглядаються теорії течії. У цих теоріях розглядається зв'язок між нескінченно малими приростами деформацій та напружень.

На підставі експериментальних перевірок теорій пластичності [42, 43] встановлено, що в разі простого навантаження обидві теорії добре підтверджуються дослідями та збігаються. Складне навантаження краще узгоджується з теорією пластичної течії, ніж з деформаційною теорією, яку ще називають теорією малих пружно-пластичних деформацій. Під час пластичної деформації плоских елементів листової заготовки, яка виникає у разі недостатнього тиску притискування, цілком допустимо користуватися теорією малих пружно-пластичних деформацій.

2.5 Вибір методів випробування

Для випробувань листових деталей транспортних засобів перевагу надано методам, які здійснюють в умовах прискорених і підвищених навантажень (прискорені випробування).

На сьогодні працездатність конструкційних матеріалів в умовах дії циклічних навантажень характеризується двома основними параметрами: максимальним безпечним напруженням, за якого матеріал не руйнується до бази випробувань – межею витривалості, а також числом циклів, протягом якого матеріал не руйнується на заданому рівні амплітуди напружень циклу – довготривалості. Зважаючи на відсутність на сьогодні закінченої загальноприйнятої теорії втоми, основним способом визначення таких параметрів є експеримент, завданням якого є побудова похилої гілки кривої втоми, за допомогою якої здійснюють прогнозування довговічності N ; на заданому рівні напружень, і визначення горизонтальної ділянки кривої втоми, яка характеризує значення межі витривалості.

На сьогодні розроблено достатньо багато методів і методик побудови кривої втоми [44–48].

Останнім часом все більшу увагу дослідників привертає питання розробки прискорених методів [44–48] визначення характеристик опору втоми конструкційних матеріалів за результатами випробувань малих вибірок виробів.

Однак усі вони не забезпечують достатньої точності та достовірності отриманих результатів.

У роботах [44–48] розроблено основні положення методики оцінювання працездатності металевих матеріалів, заснованої на науковій концепції втоми, згідно з якою все поле експериментальних даних зображено як сімейство кривих втоми конкретних зразків, проведення із загального полюса під різними кутами до осі напружень [44–48]. З цих позицій формулу втоми розглядають як трипараметричне рівняння, у якому змінною величиною є також показник ступеня m , що характеризує властивості матеріалу, отримані в процесі виробництва.

Шкода, що заподіяна корозією металу, визначається не тільки втратами металу та зниження механічної міцності конструкцій. Продукти корозії забруднюють деталі, знижують механічні характеристики та пошкоджують зовнішню поверхню облицювальних деталей. Механізм руйнування деталей, що експлуатуються на відкритому повітрі, ураховується як комплексний, і залежить від атмосферних опадів (дощ, сніг, вихрові потоки повітря), ударного їх впливу, забруднення середовища, різниці електрохімічних потенціалів. Тому доцільно провести такі випробування:

- випробування на корозійну стійкість до дії кліматичних чинників у камері соляного туману;
- прискорені випробування з періодичністю конденсації вологи.

Випробування на корозійну стійкість до дії кліматичних чинників за ДСТУ ISO 9227: 2015 у камері соляного туману

Метод випробувань. Відповідно до вимог ДСТУ ISO 9227:2015 п. 5.2 «Випробування на корозію у штучних атмосферах. Випробування соляним туманом» випробування на стійкість в атмосфері соляного туману проводили у камері соляного туману SC 450/KWT. Дані випробування дозволяють максимально наближено моделювати морський клімат і клімат прибережних зон завдяки можливості програмування ключових чинників морської атмосфери – температури, вологості та концентрації хлориду натрію.

Прискорені випробування з періодичністю конденсації вологи здійснювалися за ГОСТом 9.054-75 п. 1.4.3.

Суть методу полягає у витримці зразків у кліматичній камері протягом певного часу за впливу на них корозійного середовища, створюваного завдяки підтримуванню підвищеної температури та відносної вологості повітря з періодичною конденсацією вологи на зразках.

Для проведення випробувань як обладнання використовували камеру з автоматичним регулюванням параметрів і дистильовану воду за ГОСТом 6709-72.

Випробування проводили цілодобово в кілька циклів. Тривалість кожного циклу випробувань дорівнювала 24 год. Кожен цикл складався з двох частин. У першій частині циклу випробування проводили за температури 400°C і відносної вологості повітря 95 %. Тривалість першої частини циклу становила 7 годин. У другій частині циклу були створені умови конденсації вологи на зразках у камері унаслідок їх охолодження на $5\text{--}100^{\circ}\text{C}$. Тривалість другої частини циклу становила 17 годин.

Оцінювання результатів випробувань проведено візуальним методом з визначенням сумарної площі всіх корозійних поразок на металевій поверхні зразків, вираженої у відсотках (ГОСТ 9.311-87).

Висновки до розділу 2

1. Обґрунтовано застосування процесу послідовного формозмінювання рифтів по два за один хід преса способом обтягування (формування) за пуансоном з фіксацією по відштампованих рифтах з обмеженням осередку деформації, унаслідок зменшенню довжини пуансона, що оформляє поверхню закінцівки рифту на пневмомеханічному пресі зусиллям 12,5 МН.

2. Визначення напруженодеформованого стану та прогнозування форми, що вільно деформується, елементів товстолистової заготовки з елементами жорсткості (прямолінійними рифтами) передбачено проводити з використанням аналітичних і чисельних методів (розробленого та у стандартному пакеті

програм). За аналітичного розв'язання завдання пластичного деформування передбачений поділ заготовки на ділянки – плоскі та з постійною кривизною. Для плоских ділянок поле напружень визначають з використанням методу течії тонкого шару по жорстких поверхнях, для тих, що мають кривизну, спільним рішенням диференціальних рівнянь рівноваги, умови пластичності та рівнянь зв'язання напружень та збільшень деформацій.

3. Адекватність результатів теоретичних досліджень запропоновано експериментально оцінювати з використанням методу координатних ділильних сіток, що дозволяє визначити компоненти тензора деформацій і в рамках деформаційної теорії напружень тензор напружень з подальшою апроксимацією і згладжуванням результатів експериментальних досліджень результатів експериментальних досліджень методом кінцевих елементів.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РЕМОНТУ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

3.1 Класифікація листових деталей транспортних засобів і операцій холодного листового штампування

Технологічні процеси листового штампування широко застосовують для виробництва вантажних й пасажирських вагонів і автомобілів різного класу. Це обумовлено високими показниками якості одержуваних деталей і низькою собівартістю, порівняно з іншими альтернативними технологіями отримання аналогічних деталей.

Фахівці в галузі листового штампування – М. І. Лисов [49], С. Н. Мошнин [50], вважають, що принципове значення для аналізу наявних технологічних процесів і пошуку нових напрямів розвитку технології має класифікація за загальними конструктивними і технологічними ознаками, за застосовуваними матеріалам та іншими ознаками.

Витягування, формування належать до групи формозмінювальних операцій холодної штампування, їх широко використовують на машинобудівних підприємствах для отримання деталей з листового металу та інших видів прокату.

Існує широка номенклатура облицювальних деталей автомобілів та інших транспортних засобів зі складною конфігурацією, які виготовляють штампуванням-витягуванням, формуванням, відбортовкою тощо з листових заготовок. Загальними для цих деталей є наявність стінки, бортів і різних елементів, що підвищують жорсткість, а також складна геометрія форми деталей [1, 5, 51].

Розробка технологічного процесу таких деталей – тривалий і трудомісткий процес. Попри великі зусилля та швидкий прогрес у розвитку теорії пластичності й чисельних методів, багато важливих завдань вимагають

проведення подальших досліджень, як у теоретичній, так і в експериментальній галузях.

Листоштампувальні роботи переважають у загальному виробничому процесі ремонту транспортних засобів [52–62]. У заготівельно-штампувальних цехах виготовляють деталі каркаса і кабін, загалом понад 85 % матеріалів, необхідних для виготовлення виробів наземного транспорту. Значну частину деталей сучасних транспортних засобів (вагонів, автомобілів, автобусів та ін.) виготовляють з листового матеріалу, пресованих профілів і труб, приблизно 60 % деталей, що оформлюють зовнішній контур. Багато деталей внутрішнього обладнання (підлоги, перегородки, приладові щитки та панелі, панелі інтер'єру і т. д.) і майже всі елементи систем трубопроводів (патрубки тощо) виготовляють різними методами в пресових і заготівельно-штампувальних цехах. Від технологічності цих деталей залежить собівартість і ресурс виробу в цілому.

На сьогодні трудомісткість виготовлення деталей штампуванням складає 7–16 % від загальної трудомісткості виготовлення виробів транспорту, що в абсолютних цифрах становить значну величину. До того ж необхідно зазначити, що в пресових цехах частка доводочних ручних робіт все ще складає близько 10–30 % [63–65].

Масштаби листоштампувальних робіт відображаються на кількості листоштампувального оснащення та трудомісткості його виготовлення. Не менше 60 % його виготовлення припадає на листоштампувальні роботи. За умови серійного виробництва виробів транспорту необхідно виготовити понад 10 тисяч штампів, десятки тисяч шаблонів, сотні пуансонів для обтягування та контролю деталей, кілька тисяч формоблоків, а також інше оснащення для формоутворення та контролю деталей.

Загальна класифікація листових деталей транспортних засобів за конструктивними ознаками показана на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Загальна класифікація листових деталей транспортних засобів за конструктивними ознаками

Класифікація охоплює основні, найбільш поширені в конструкції машин деталі, які під час виготовлення в умовах ремонту потребують певного підходу:

- обшивки, облицювальні деталі – найбільш великогабаритні деталі, до яких існують підвищені вимоги щодо якості поверхні, а їх значні габаритні розміри висувають особливі вимоги до механізованих засобів їх виробництва;

- деталі каркаса з профілів – найчисленніші в конструкції транспортних засобів;

- деталі каркаса з листових матеріалів – загальним для них є наявність стінки, бортів і різних елементів, що підвищують жорсткість і зменшують масу. Характерні деталі – діафрагми, різні окантовки, елементи жорсткості, які підлягають заміні;

- деталі з трубних заготовок – вимагають особливої уваги під час проєктування та ремонту. Необхідно, щоб під час їх роботи був забезпечений необхідний ресурс. Конструкції цих деталей мають бути технологічними. У деталях не повинно бути перенапруження матеріалу під час пластичної деформації окремих конструктивних елементів.

Окрім того, допускається застосування операції холодного листового штампування під час ремонту кузовних деталей. Холодне листове штампування

об'єднує велику кількість різноманітних операцій, які можна систематизувати за технологічними ознаками [53, 66–71].

Кожен з основних видів деформацій холодного штампування поділяється на окремі конкретні операції, що характеризуються особливістю та призначенням роботи. На рис. 3.2 наведено класифікацію основних операцій холодного листового штампування (ХЛШ).



Рисунок 3.2 – Класифікація основних операцій холодного листового штампування під час виробництва та ремонту

Проектуючи деталі з листа, профілів і труб, важливо знати технічні можливості заготівельно-штампувального виробництва та орієнтуватися на найсучасніші технологічні процеси й обладнання. До того ж доцільність застосування штампування та різних його методів визначають за масштабами виробництва, формою деталі, якістю матеріалу, коефіцієнтом його використання та можливостями впливу на ресурс, втомною міцністю і корозійною стійкістю.

Загального рішення цього питання, придатного для всіх випадків виробництва, не може бути. Орієнтовно можна вважати, що:

- за умови індивідуального виробництва застосування процесів

штампування раціональне тільки в разі використання універсальних штампів;

– за умови дрібносерійного та серійного виробництва рекомендується застосовувати методи пластичного деформування листових, профільних і трубчастих заготовок для отримання деталей складної конфігурації в інструментальних і спрощених штампах на універсальних пресах та молотах або на спеціалізованому обладнанні з використанням простого оснащення;

– за умови багатосерійного виробництва необхідне саме широке застосування штампування та її новітніх методів з механізацією і автоматизацією виробництва.

За останні роки створені потужні гідравлічні преси для групового штампування листових деталей каркаса з деформувальним зусиллям до 100 МН, гідродинамічні молоти – до 300 МН, серія гідропресів для глибокого витягування – до 150 МН, пневмомеханічні преси зусиллям до 20 МН, спеціалізовані верстати для гнуття труб, верстати з програмним керуванням для розкроювання листових матеріалів і багато інших видів обладнання, що значно полегшують виготовлення деталей з листів, профілів і труб, які не потребують ручних доводочних операцій, що дозволяють виготовляти деталі значно більших габаритних розмірів і з більш високою точністю.

Створення нової техніки та спільне відпрацювання проєктувальниками і технологами конструктивних елементів дозволили знайти оптимальні рішення щодо конструкцій деталей та функціонально орієнтованих технологій, що відповідають експлуатаційним вимогам, технологічності та ремонту. І нині основне завдання полягає в тому, щоб якомога повніше використовувати накопичений досвід для скорочення термінів технологічного проєктування та підготовки виробництва до випуску нових і ремонтних виробів [32, 72–84] з прогнозованим ресурсом щодо визначення основних причин руйнування досліджувальних деталей (табл. 3.1).

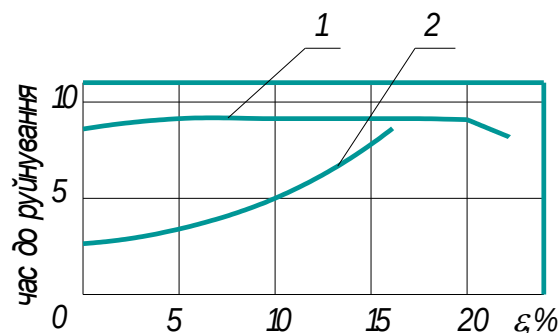
Таблиця 3.1 – Причини руйнування листових деталей транспортних засобів і типові представники

Пошкодження	Типові представники деталей
Корозійні пошкодження	«Лист верхній шкворневої балки»
Експлуатаційні пошкодження	Вм'ятини
Зношування	«Кришка люка», «Накладка»
Втомне руйнування	«Ободи коліс»

3.2 Вплив пластичної деформації на ресурс і експлуатаційну властивість листових деталей

У процесі технологічного циклу виготовлення, експлуатації та ремонту неминуче виникають пластичні деформації. З урахуванням літературних даних [83] їх можна поділити на основні групи: деформації, пов'язані з технологічною спадковістю, історією деформування та експлуатаційні. У свою чергу, до деформацій, пов'язані з технологічною спадковістю, належать: вихідні деформації в основному матеріалі під час виготовлення заготовок різними методами (литтям, порошковою металургією, обробкою тиском); деформації, що виникають унаслідок заготівельних операцій і складання (правка, профілювання, формотворчі і розділові операції; після зварювальної технологічної деформації; деформації, що виникають унаслідок остаточної обробки (термічна обробка, фінішна, зміцнювальні методи обробки). Деформації виникають у процесі отримання листових деталей під час формозмінювальних і розділових операцій (історія деформування) істотно позначається на пластичності матеріалу. Остання суттєво впливає на ресурс і експлуатаційну надійність деталі. За пластичної формозміни залежність показника напруженого стану від інтенсивності деформування $\eta = f(\varepsilon_n)$ має назву «шлях деформування» або «історія деформування». Експериментальними даними [85] визначено, що пластичність зростає зі збільшенням похідної $d\eta/d\varepsilon_n$. Це означає, що за діаграмами $\eta = f(\varepsilon_n)$ за умови забезпечення максимально корозійної стійкості листових деталей слід здійснювати вибір

матеріалу за відомою класифікацією матеріалу за пластичністю та зміцнюваністю [86]. Перевагу слід віддавати високопластичним матеріалам, що сильно змінюються; за необхідності, слід урахувати зварюваність матеріалу та інші технологічні та експлуатаційні властивості. За перевагою матеріали розташовують у такому порядку: високопластичні – сильнозміцнювальні; пластичні – середньозміцнювальні; середньопластичні – слабозміцнювальні (рис. 3.4). Від «крутизни» діаграми пластичності суттєво залежить і ресурс пластичності, що залежить від схеми напруженодеформованого стану. Більш досконалі процеси листового штампування, що супроводжуються «м'якою» схемою деформування ($\eta < 0$), порівняно з «жорсткою» схемою деформування ($\eta > 0$). Схема зниження стійкості проти корозійних руйнувань зумовлює: 1) збільшення концентрації напружень II роду; 2) виникнення розтягувальних напружень I роду у разі нерівномірної пластичної деформації. Унаслідок пластичного формозмінювання з наявністю неоднорідної деформації з'являються додаткові внутрішні взаємоврівноважені сили (напруження I і II роду). Найбільш раціональний процес пластичного деформування (ідеальний для осередку деформації) створює однорідне деформування та швидкісний стан максимальне наближення до ідеального процесу пластичного деформування. Окрім того, підвищення корозійної стійкості досягається завдяки зменшенню, перерозподілу, зняттю власних напружень I роду та деконцентрації напружень II роду.



1 – розтягнення («жорстка» схема); 2 – стійка («м'яка» схема)

Рисунок 3.3 – Вплив пластичної деформації сталі Ст.3сп



Рисунок 3.4 – Вплив пластичної деформації на ресурс листових деталей

Установлено [86], що оптимальною інтенсивністю деформації щодо забезпечення підвищення межі витривалості матеріалу поверхневого шару деталі є деформації, рівні граничним рівномірним, тобто $\varepsilon_p = \text{opt} \varepsilon_i$, де ε_p ; $\text{opt} \varepsilon_i$ – деформації, гранична рівномірна та оптимальна. Зокрема, ця умова є оптимальною і для деталей, що працюють на зношування. Для об'ємних деталей оптимальна деформація поверхневого шару досягається із застосуванням методів зміцнювальної обробки, наприклад поверхневої пластичною деформацією. Тонколистові деталі, одержувані методами листового штампування мають приблизно однакову деформацію по товщині деталі.

Використовуючи різні конструктивні та технологічні прийоми для формоутворення можливо отримання інформації рівним або наближеним до граничних рівномірних. Це забезпечить цим деталям граничну витривалість або зносостійкість, наприклад, ободи коліс, ресори, склізи, борти машин і т. д. Знаючи, за якого рівня деформації досягається максимальна довговічність, тобто число циклів до руйнування, можна побудувати криву втоми для деформованих зразків з різною інтенсивністю деформацій, наприклад для ободів коліс автомобільного транспорту. Для цього доцільно проводити випробування зразків колеса на втому за чистого вигинання обертового зразка в звичайних умовах. Для цього доцільно застосовувати машину 1709-600/1800. Для випробувань застосовувані зразки діаметром $5 \cdot 10^{-3}$ м (5 мм). Частоту обертань випробовуваних зразків застосовуємо рівною 4800 об/хв. Зразки (16 шт) піддають розтягуванню до деформацій ε_e , де ε_e – деформація, відповідна межі міцності σ_e :

$$\varepsilon_e; \varepsilon_p; 0,8 \cdot \varepsilon_p; 0,6 \cdot \varepsilon_p; 0,2 \cdot \varepsilon_p.$$

Випробування проводилися під час згинального моменту рівному 50 н. м. Випробовувані матеріали, які застосовуються для виготовлення ободів коліс: результати випробувань зображені у вигляді кривої втоми.

Необхідність проведення цих випробувань пов'язана з підтвердженням даних про залежність довговічності ободів коліс від деформованого стану. Для підвищення достовірності отриманих результатів були проведені випробування дисків коліс з вигином з обертанням за трьома схемами напруги («прямий», «зворотний», під кутом). Дані дослідження не мають на меті визначення особливостей руйнування залежності довговічності від розсіювання геометричних параметрів дисків коліс у межах поля допуску та ін.

Випробування націлені на обґрунтування технологічних схем формозміни на довговічність обода колеса. Для визначення деформації матеріалу обода унаслідок формозміни використовувався метод визначення напружень за

розподілом твердості. Значення деформацій, рівних граничним рівномірним, визначають за простою залежністю [87–96]:

$$\varepsilon_p = 245 / HД , \quad (3.1)$$

де $HД$ – пластична твердість матеріалу, яка визначається за ГОСТ 18835-73. Можна також скористатися залежністю, яка пов'язує пластичну твердість із твердістю за Роквеллом (шкала В), вимірюваною на поверхні

$$HД = P - P_0 , \quad (3.2)$$

де $P - P_0$ – повне та попереднє навантаження на індикатор (шарик діаметром $D=1,588$ мм).

Аналогічні методики використані при прогнозуванні ресурсу або забезпеченні його заданих характеристик елементів конструкцій деталей транспортних засобів, які працюють в умовах зношування та корозійного впливу. Підвищення довговічності транспортних засобів і надійності залежить від конструкторів, які зобов'язані вибрати раціональну конструктивну схему машини й запроектувати її деталі та вузли із заданою довговічністю.

Питання створення машин, що відповідають вимогам організації праці під час їх обслуговування, забезпечення ремонтної технологічності, рівномірності та рівної зносостійкості, експериментальної вивірки й доведення нових конструкцій також повинні бути вирішені науковцями, конструкторами і технологами з урахуванням довговічності та надійності.

Оптимальна довговічність та надійність машин повинна забезпечуватися на всіх етапах створення машин. При цьому слід урахувати, що показники довговічності та надійності завжди встановлюються для певних умов експлуатації.

Стосовно листових деталей транспортних засобів, які класифіковані зі складовими частинами борт-стінка [5], найбільшу корозійну стійкість мають найменш деформовані деталі.

Залежно від впливу на експлуатаційні властивості листових деталей, вони розташовані в такому порядку:

- деталі без борта з пласким бортом без стінки;
- деталі без борта з криволінійною стінкою;
- деталі з криволінійними бортами без стінки;
- деталі з пласким бортом;
- деталі з пласкою стінкою;
- деталі з криволінійним бортом і пласкою стінкою;
- деталі з криволінійною стінкою та пласким бортом;
- деталі з криволінійним бортом і криволінійною стінкою.

Тобто найбільший ресурс мають деталі без борта та стінки або деталі без борта або без стінки з криволінійною поверхнею або увігнутістю у зовнішню сторону поверхні транспортного засобу. Залежно від кривизни поверхні, перевага надається облицювальним деталям одинарної кривизни, порівняно з листовими деталями подвійної кривизни.

Якщо жорсткість листових деталей може бути підвищена унаслідок утворення рифтів і впадин, то залежно від їхньої конфігурації, експлуатаційна надійність розташовується у такому порядку:

- з паралельними рифтами, що неперехрещуються;
- з криволінійними рифтами, що неперехрещуються;
- з криволінійними та прямолінійними рифтами, що неперехрещуються;
- жорсткості, що утворені впадинами однотипними та різнотипними.

Потім у тому ж порядку розташовані деталі з неперехрещеними рифтами.

Під час виготовлення елементів жорсткості перевага надається процесам, що розташовані у такому порядку: згинання зі стисканням; чисте згинання; згинання з розтягуванням; операції формування та формування зі згинанням.

Загалом вплив технологічних чинників на експлуатаційну стійкість листових деталей надано у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Вплив технологічних чинників на експлуатаційну стійкість листових деталей

Технологічні чинники	Змінювання фізико-механічних властивостей	Вплив режимів листового штампування на експлуатаційні властивості деталей транспортних засобів
1	2	3
Вид прикладання навантаження		
– одночасне	Не впливає	Не впливає
– послідовне	Не впливає	Не впливає
Швидкісні умови навантаження:		
– статичне	Впливає	Впливає
– динамічне	Більше, ніж статичне	Більше, ніж статичне
– імпульсне	Більше, ніж динамічне	Більше, ніж динамічне
– циклічне	Як статичне	Як статичне. Суттєво підвищується уведенням інгібіторів корозії
Спільність середовища, яка використовують як деформувальний інструмент і носій форми:		
– газове	Вплив однаковий	Суттєво впливає
– рідинне	Вплив однаковий	Суттєво впливає
– жорстке	Вплив однаковий	Менше впливає
Температурні умови:		
– холодне	Впливає	Впливає
– гаряче	Впливає більше, ніж холодне	Впливає більше, ніж холодне
Технологічна спадщина	Впливає	Впливає
Показник напруженого та деформованого стану	Впливає. Особливо в умовах інтенсивної пластичної деформації з уведенням інгібіторів корозії	Впливає. Особливо в умовах інтенсивної пластичної деформації з уведенням інгібіторів корозії

3.3 Морфологічний аналіз технологій ремонту кузовних і облицювальних деталей наземного транспорту

Багатофункціональне, інтенсивне і не завжди кваліфіковане використання коштів наземного транспорту (автомобілів, вагонів, тракторів і т. д.) вимагає їх якісного технічного обслуговування та ремонту. Під час експлуатації одного з видів наземного транспорту – вагонів відбувається старіння кузовних деталей і їх пошкодження унаслідок взаємодії з вантажно-розвантажувальною технікою та вантажем, що перевозиться, через вандалізм та ін. Питання ремонту кузовних деталей гусеничного транспорту не викликає особливих труднощів і не постає так гостро.

Підприємства, які виконують ремонт транспортних засобів (вагоноремонтні, судноремонтні, авто- та авіаремонтні) надто потребують сучасного універсального ковальсько-пресового обладнання. Одним зі способів підвищення життєвого циклу виробів транспорту є їх ремонт. У дослідженні ремонт пов'язаний із заміною облицювальних і кузовних деталей та їхніх елементів у разі необхідності їх заміни, унаслідок поступового старіння (корозія/ерозія), зношування або механічних пошкоджень.

Причинами останніх в більшості випадків можуть бути нераціональний вибір технології виготовлення деталей, вузлів і агрегатів, порушення правил навантаження, вивантаження вантажів і маневрових операцій, незадовільний стан елементів верхньої будови колії та рухомого складу, відступ від регламентованої технології складання конструкції.

Виробництво та відновлення листових кузовних й облицювальних деталей пов'язано з необхідністю забезпечення достатнього рівня робочих зусиль преса, габаритних розмірів постелі та необхідної величини робочого ходу деформувального інструменту. Розв'язати завдання розширення технологічних можливостей зниження енерго- і металоємності та підвищення робочих зусиль можливо з використанням методів імпульсного листового штампування (штампування вибухом, магнітно-імпульсним, електрогідравлічним та ін.), а також процесів обробки металів тиском, за яких відбувається мимовільне

формозмінювання заготовки унаслідок незначної силової або теплової дії. Зменшення деформувальних зусиль досягається завдяки вибору найбільш раціонального способу формозмінювання та схеми деформування.

Удосконалення технологічного оснащення застосовуваного в листоштампувальному виробництві на ремонтних підприємствах, відбувається завдяки підвищенню його універсальності, що забезпечує можливість його багаторазового застосування за зміни об'єктів виробництва.

Не менш ефективною є в цьому випадку розробка та створення безштампових засобів технологічного оснащення, застосування штампів блоково-пакетного типу змінного інструменту.

Особливо актуально постає проблема ремонту та відновлення кузовних і облицювальних деталей колісного транспорту. Збільшення кількості автомобілів у світі нерозривно пов'язане з ростом дорожньо-транспортних пригод, що є серйозною проблемою в соціальній та економічній сферах суспільства. Основна кількість дорожньо-транспортних пригод пов'язана з пошкодженням облицювальних тонколистових автокузовних деталей. За статистичними даними, наведеними в роботах А. В. Гнатова [77, 97–105], до 80 % пошкоджень припадає на невеликі та середні ушкодження, зазвичай це вм'ятина, незворотні прогини, гофри, пуклівки, місцеві стоншення і т. д., які не потребують заміни всього елемента обшивки кузова автомобіля. Відзначено, що більше половини таких пошкоджень складають зони з утрудненим або закритим зворотним доступом. Серед методів відновлення автокузовних деталей автомобілів переважно використовують методи зовнішнього рихтування для відновлення деталей без розбирання порушення лакофарбових покриттів. Слід наголосити на необхідності рихтування не тільки кузовних деталей легкових автомобілів, але й деталей залізничного транспорту та інших транспортних засобів. Тому наявність пошкоджень і вм'ятин є чинниками та прискорювачами корозії.

Для визначення найбільш раціонального способу деформування для правки, рихтування, виготовлення модернізації кузовних та облицювальних деталей наземного транспорту необхідне застосування морфологічного методу

заснованого на методах комбінаторики з урахуванням законів розвитку технічних систем та механіки суцільних середовищ [106, 107].

Облицювальні та кузовні деталі з листа класифікуємо за двома визначальними параметрами або елементами (розділ 3.2), як запропоновано Е. І. Ісаченковим [5], що названі термінами «стінка» або «борт». Безліч деталей з листа об'єднані у вісім класів: деталі без борта з плоскою та криволінійною стінкою (класи 1,2); деталі з плоским бортом без стінки (клас 3); з плоскою та криволінійною стінкою з плоскими бортами (класи 4, 5, 6); деталі з криволінійними бортами без стінки (хомути, прокладки і т. д.), які легко демонтуються (клас 7); деталі з криволінійними стінками та бортами (клас 8).

Переважну більшість облицювальних і кузовних деталей, які підлягають відновленню або заміні, це деталі без борта з плоскою та криволінійною стінкою незамкнутого контуру одинарної та подвійної кривизни. У свою чергу деталі одинарної кривизни поділяють на деталі однозначної та двозначної кривизни, аналогічно поділяють деталі подвійної кривизни. Рихтуванню можуть підлягати й деталі паливної системи: глушник, резонатор, труби, патрубки. Зазвичай це деталі замкнутого контуру одинарної та подвійної кривизни, однозначної та двозначної кривизни. Для визначення енергетичних і силових параметрів рихтування проводимо класифікацію вм'ятин відповідно до конструктивних класифікаторів листових деталей автомобіля.

Серед видів наземного транспорту в морфологічну таблицю заносимо такі види транспорту y_j^1 :

y_1^1 – рейковий;

y_2^1 – колісний;

y_3^1 – гусеничний.

За місцем розташування вм'ятини поділимо y_j^2 :

y_1^2 – рихтування вм'ятин, розташованих на плоскій поверхні (борт й стінка);

y_2^2 – рихтування вм'ятин із криволінійною поверхнею одинарної кривизни;

y_3^2 – рихтування вм'ятин із криволінійною опуклою поверхнею одинарної кривизни;

y_4^2 – рихтування вм'ятин із криволінійною увігнутою поверхнею;

y_5^6 – рихтування вм'ятин із криволінійною опуклою заготовкою;

y_6^2 – рихтування циліндричних (трубчастих) деталей;

y_7^2 – рихтування конічних деталей.

За формою y_j^3 , де $j = 1, 2, \dots$; вм'ятини поділимо:

y_1^3 – вм'ятини подвійної кривизни;

y_2^3 – прямолінійні вм'ятини;

y_3^3 – циліндричного перетину;

y_4^3 – прямокутного перетину;

y_5^3 – трапецевидного перетину;

y_6^3 – трикутного перетину;

y_7^3 – вм'ятини подвійної двозначної кривизни;

y_8^3 – криволінійні вм'ятини;

y_9^3 – криволінійні вм'ятини циліндричного перетину;

y_{10}^3 – криволінійні вм'ятини прямокутного перетину;

y_{11}^3 – криволінійні вм'ятини трапецієподібного перерізу;

y_{12}^3 – криволінійні вм'ятини трикутного перетину.

Види пошкодження кузовних деталей y_j^4 :

y_1^4 – корозія;

y_2^4 – ерозія;

y_3^4 – механічні.

Механічні пошкодження можуть бути відновлюваними або такими, що усуваються або не усуваються. В останньому випадку відбувається порушення

суцільності (пробоїни та тріщини). У вагонобудуванні допустимо їх заварювати або використовувати накладки; для автомобільного транспорту це неприпустимо. Доцільно проблеми пошкодження розглядати спільно з класифікатором деталей наземного транспорту.

Слід зазначити, що кузовні деталі вагонів з глибиною вм'ятини, опуклості та прогином, меншим 25 мм, допускається експлуатувати. За ремонтпридатністю кузовні, облицювальні деталі поділяємо на відповідні ознаки y_i^5 :

y_1^5 – такі що підлягають ремонту;

y_2^5 – такі що підлягають заміні;

y_3^5 – з можливістю заміни цільної деталі на зварну, що складається з декількох елементів.

В останньому випадку в кузовних деталях вагонів і автомобілів, що містять елементи жорсткості допускається їх вирізання. Після цього виготовляють елемент жорсткості та приварюють замість старого. Це пов'язано з тим, що елементи жорсткості найбільш піддаються корозії в місцях вигинів. Окрім того, допускається виготовлення довгомірних профілів складеними. Слід також додати до цього аспекту проблеми такі складові y_j^6 :

y_1^6 – з можливістю заміни матеріалу;

y_2^6 – з можливістю змінювання форми.

З огляду на те, що термін експлуатації транспорту після ремонту значно менший, цілком раціонально виготовляти деталі, що підлягають заміні з дешевшого матеріалу. Наприклад, для виготовлення ремонтних кришок люків для вагонів, що перевозять сипучі матеріали, допускається заміна сталі 09Г2С на сталь Ст 3. Однак при цьому слід зіставляти не тільки вартість, але й пластичні властивості матеріалів. Раціональним варіантом ремонту є дозвіл на заміну гофрованих листів консольних частин полу критих вагонів на гладкі товщиною 3 мм.

Аспектом проблеми є й штампування елементів деталей, які допускається виготовляти окремо. Зазвичай, це елементи рельєфу y_j^7 :

y_1^7 – ребра жорсткості (прямолінійний рифт);

y_2^7 – пуклівки (сферичний рифт), видавки;

y_3^7 – підсічки кінцеві;

y_4^7 – підсічки серединні;

За умовами ремонту варіанти такі y_j^8 :

y_1^8 – у кустарних умовах;

y_2^8 – на спеціалізованих підприємствах.

У кустарних умовах зазвичай ремонтують вм'ятини власники автомобілів, та доцільно навіть до аспектів проблеми додати необхідні технічні засоби. У межах цього аналізу не будемо деталізувати види ремонту на спеціалізованих підприємствах (деповський ремонт, капітальний, технічне обслуговування).

Обладнання, що застосовують для правки, рихтування та виготовлення нових деталей замість тих, що стали непридатними, розглянемо зазвичай, не вдаючись до детальної класифікації штампувального обладнання. Це пов'язано з великою різноманітністю ковальсько-штампувального і пресового устаткування та багатоваріантністю процесів формозмінювання, тобто одна й та сама деталь може бути виготовлена різними методами штампування, тому пропонуються такі варіанти y_j^9 :

y_1^9 – універсальне;

y_2^9 – спеціалізоване;

y_3^9 – обладнання, що застосовується не за прямим призначенням.

Останній варіант пов'язаний з можливістю використання, наявного на підприємстві обладнання, не за прямим призначенням. Наприклад, на кромкозгинальному стані можливо проводити не тільки згинання, а й

формування, витяжку, правку та інше. Для цього необхідно забезпечити кріпленням відповідного інструменту.

За видом формозмінювального впливу y_j^{10} :

y_1^{10} – одночасне;

y_2^{10} – послідовне.

Деякі деталей кузовних деталей вагонів, що підлягають заміні під час ремонту, ремонтні підприємства не можуть виготовити через відсутність необхідного обладнання. Унікальні преси зусиллям 50 Мн (5000 т) є на вагонобудівних підприємствах. Однак їх завантаження досить велике та вклинитися до їх процесу майже неможливо. Тому ремонтники зазвичай звертаються до підприємств, що випускають автомобілі, які менше завантажені. Однак і ці підприємства не мають пресів зусиллям 50 Мн. У такому випадку доводиться вдаватися до пошуку варіантів послідовного впливу та поелементного штампування.

З огляду на те, що під час виправлення та рихтування облицювальних деталей автомобілів знаходять застосовують методи магнітно-імпульсного та вакуумного штампування, слід розглянути й види середовища, що впливає на ефективність процесів рихтування. Перевага методу пов'язана з можливістю не порушувати лакофарбове покриття пошкоджених деталей. Слід зазначити, що на підприємствах, які обслуговують вантажні вагони, є магнітно-імпульсні установки (МІУС) для розпушення змерзлих вантажів. Ці установки за необхідності можна адаптувати й для виробництва листоштампувальних операцій.

Тому наступний аспект проблеми – вид середовища, що впливає на ефективність процесів рихтування, який використовують як інструмент y_i^{11} :

y_1^{11} – тверда;

y_2^{11} – пластично в'язка;

y_3^{11} – еластична;

y_4^{11} – рідинна;

y_5^{11} – газова;

y_6^{11} – силове поле;

y_7^{11} – вакуум, пар.

До того ж, як окремий аспект слід виокремити безштампові методи. Ці методи – y_i^{12} – передбачають:

y_1^{12} – штампування рідиною, що кристалізується;

y_2^{12} – деформування металами, що «розбухає»;

y_3^{12} – деформування за допомогою використання процесу епітаксії;

y_4^{12} – магнітно-імпульсне штампування;

y_5^{12} – вакуумне штампування;

y_6^{12} – деформування з використанням реактивних складових деформувальних зусиль.

Результати морфологічного аналізу зведені в таблицю (рис.3.5)

Морфологічна комбінаторика передбачає:

$3 \cdot 7 \cdot 12 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 6 = 9144576$ варіантів технологій ремонту та відновлення кузовних і облицювальних деталей автомобілів.

Варіант $y_2^1, y_3^4, y_1^5, y_2^8, y_2^9, y_2^{10}, y_6^{11}, y_4^{12}$ відповідає технології ремонту вм'ятин з використанням магнітно-імпульсного штампування. Цю ж технологію можна використовувати в процесах формування та формування витяжки.

Варіант $y_2^1, y_3^4, y_1^5, y_1^6, y_1^8, y_2^9, y_1^{10}, y_7^{11}, y_5^{12}$ відповідає технології формозмінювання із застосуванням вакууму. Метод широко використовують на станціях технічного обслуговування. Однак такий спосіб суто кустарний і вимагає подальшого розвитку зі створенням спеціалізованого, багатофункціонального інструменту.

Вибір найбільш ефективних технологій (технічних рішень) можливий унаслідок виключенню найгірших комбінацій та елементів. Необхідний також

облік законів розвитку технічних систем, а в даному випадку і законів механіки та логічного деформування. В останньому випадку проводять оцінювання граничних можливостей процесів та їх економічної ефективності.

АСПЕКТИ ПРОБЛЕМИ	S_i	ВАРІАНТИ РІШЕННЯ y_j^i
Вид наземного транспорту	S_1	y_1^1, y_2^1, y_3^1
Вм'ятини, прогини, опуклості за місцем розташування	S_2	$y_1^2, y_2^2, y_3^2, y_4^2, y_5^2, y_6^2, y_7^2$
Вм'ятини, прогини, опуклості (залежно від форми)	S_3	$y_1^3, y_2^3, y_3^3, y_4^3, y_5^3, y_6^3, y_7^3, y_8^3, y_9^3, y_{10}^3, y_{11}^3, y_{12}^3$
Пошкодження кузовних та облицювальних деталей	S_4	y_1^4, y_2^4, y_3^4
Ремонтопридатність	S_5	y_1^5, y_2^5, y_3^5
З можливістю заміни матеріалу, геометричної форми	S_6	y_1^6, y_2^6
Елементи рельєфу, які виготовляють окремо	S_7	$y_1^7, y_2^7, y_3^7, y_4^7$
Умови ремонту	S_8	y_1^8, y_2^8
Устаткування	S_9	y_1^9, y_2^9, y_3^9
Вид формозмінювального впливу	S_{10}	y_1^{10}, y_2^{10}
Вид деформувального середовища	S_{11}	$y_1^{11}, y_2^{11}, y_3^{11}, y_4^{11}, y_5^{11}, y_6^{11}, y_7^{11}$
Безштампові методи	S_{12}	$y_1^{12}, y_2^{12}, y_3^{12}, y_4^{12}, y_5^{12}, y_6^{12}$

Рисунок 3.5 – Морфологічна модель безлічі технологій ремонту кузовних й облицювальних деталей наземного транспорту

Коротку узагальнену технічну інформацію (з урахуванням вітчизняних і закордонних чинників) імпульсних методів рихтування та формозміни облицювальних деталей транспортних засобів подано в таблиці 3.3. У цій таблиці показані технологічні можливості методів деформування.

Таблиця 3.3 – Узагальнена технічна інформація імпульсних методів рихтування облицювальних деталей транспортних засобів

Найменування		Магнітно-імпульсне устаткування (МІУ)	Вакуумне рихтування	Перегріте парову рихтування	Комбіновані
Характеристика чинника енергії	Чинник енергії	Магнітне поле (М)	Вакуум (В)	Перегріта пара (ПП)	В+ПП МП+В
	Спосіб вивільнення енергії	Зміна магнітного поля	Переміщення бойка (ПБ), атмосферний тиск (АТ)	Розширення (Р)	ПБ+Р
	Довготривалість імпульсу (с)	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-2}$	10^{-3}	-
	Швидкість хвилі тиску або інструменту ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$)	3000 - 6000	15 - 30	20 - 50	-
	Середовище, що передає	Повітря, магнітне поле	Розділовий поршень + рідина, гель	Розділовий поршень + еластомір	-
Технологічні характеристики	Обладнання	Магнітно-імпульсні установки	Вакуумні установки	Модернізовані прес-гармати	-
	Максимальні габарити поверхні, що пошкоджена (м).	Досягнутий 0,3 Перспективний 0,8	0,3	0,3	-
	Розрахована робота деформації (кДж)	До 120	До 10	До 10	В+ ПП 15÷18
	Максимальний тиск на нерухомій перешкоді (МПа)	-	10	10^2	-

3.4 Визначення критеріїв оптимізації експлуатаційних параметрів транспортних засобів

Для максимального підвищення зносостійкості в умовах ударно-абразивного зношування необхідно мінімізувати співвідношення, що характеризує зношування за масою [108–113], яке після незначних перетворень набуває вигляду:

$$U = f \frac{H_o}{H_m} \cdot \frac{L \cdot b \cdot \sigma_n}{\sigma_\epsilon} \cdot \frac{(1 + \delta)}{\delta}, \quad (3.1)$$

де U – зношування за масою; f – коефіцієнт тертя; H_a – твердість абразиву; H_m – твердість матеріалу деталі; σ_ϵ – тимчасовий опір руйнуванню; L, b – довжина та ширина поверхні контакту; σ_n – нормальний тиск; δ – відносне подовження матеріалу деталі; β – емпіричний коефіцієнт; γ – щільність матеріалу деталі.

Для зменшення зношування необхідно зменшувати значення коефіцієнта тертя, збільшувати твердість матеріалу, тимчасовий опір руйнуванню та відносне подовження матеріалу деталі. Мінімальне значення коефіцієнта тертя досягається за певного значення $\sigma_n = \sigma_n^0$ та межі текучості матеріалу. Його значення переважно визначається умовами експлуатації та геометрією деталі. Екстремуму за σ_ϵ та δ залежність не має, однак, якщо чисельник і знаменник (3.1) розділити на σ_n , маємо в знаменнику вираз $\bar{\epsilon} \cdot \delta$, де $\bar{\epsilon} = \frac{\sigma_\epsilon}{\sigma_n}$. Оскільки

$\sigma_\epsilon > \sigma_n$ то $\bar{\epsilon} > 1$. Водночас $\frac{H_m}{H_a} < 1$.

Добуток $\bar{\epsilon} \cdot \frac{H_m}{H_a} = \lambda$ менший 1, а сума, яка визначається за статистичними

даними,

$$\lambda + \delta \approx const. \quad (3.2)$$

У цьому випадку добуток $\lambda \cdot \delta$ за умовою (3.1) буде максимальним, якщо $\lambda \approx \delta$. Для вуглецевої сталі унаслідок тертя об щебінь, унаслідок тертя об манганіт $\lambda \approx \delta \approx 0.4$.

Умова, за якої досягається максимальна експлуатаційна довговічність та зносостійкість оброблених деталей, відповідає пластичним деформаціям, рівним граничним рівномірним. Значення цих деформацій визначають за залежністю:

$$\varepsilon_p = \frac{245}{HД},$$

де $HД$ – пластична твердість матеріалу (МПа).

При цьому пластична твердість є функцією твердості за Брінелем, тобто $HД = \varphi(HВ)$, де $HВ$ – твердість за Брінелем.

3.5 Визначення мінімально можливої інтенсивності та роботи деформацій під час осесиметричного деформування

Основна мета будь-якого технологічного процесу зазвичай пов'язана із забезпеченням заданих параметрів якості, експлуатаційної надійності та ресурсу одержуваних деталей найпродуктивнішим способом з мінімальними витратами.

Безпосередньо в процесах пластичної деформації листових заготовок використовують такі критерії оптимізації: мінімізацію цільової функції, що передбачає зміну різностінності (різнотовщинності) поперечних перерізів готової деталі; мінімізацію цільової функції, що являє собою кубічний корінь із суми кубів піків контактних напружень, тобто мінімізацію рівня контактних напружень; комплексні критерії: якості, максимальної продуктивності, мінімальних технологічних витрат та ін.

Згадані раніше критерії оптимізації певною мірою є суб'єктивними і доцільність їх використання може бути оскаржена. Запобігти цим розбіжностям можна, використовуючи як оптимальний процес пластичного деформування ідеальний пластичний процес. Поняття ідеального пластичного процесу введено С. І. Губкіним і набуло подальший розвитку в роботах В. І. Єршова, Г. Д. Деля, В. А. Огороднікова, В. М. Міхалевича та інших.

Під ідеальним пластичним процесом розуміється процес, за якого зовнішнє навантаження в усьому осередку деформації створює однорідний

деформований та швидкісний стан. У такому процесі за мінімальних витрат ступінь деформації, яка досягається за один перехід, є максимальним.

Це дослідження пов'язане безпосередньо з процесом формозмінювання і його метою є максимальне наближення до ідеального пластичного процесу.

Отримане поле деформацій і швидкостей деформацій порівнюється з полем деформацій і швидкостей ідеального пластичного процесу.

У загальному випадку необхідно мінімізувати цільові функції виду

$$\Delta \bar{\varepsilon}_{ii} = \frac{(\varepsilon_{ii})_{\max} - (\varepsilon_{ii})_{\min}}{(\varepsilon_{ii})_{cp}}, \quad (3.3)$$

$$\Delta \dot{\varepsilon}_{ii} = \frac{(\dot{\varepsilon}_{ii})_{\max} - (\dot{\varepsilon}_{ii})_{\min}}{(\dot{\varepsilon}_{ii})_{cp}}, \quad (3.4)$$

де $(\varepsilon_{ii})_{\max}, (\varepsilon_{ii})_{\min}, (\varepsilon)_{cp}, (\dot{\varepsilon}_{ii})_{\max}, (\dot{\varepsilon}_{ii})_{\min}, (\dot{\varepsilon}_{ii})_{cp}$ – максимальні, мінімальні та середнє значення деформацій та швидкостей деформацій за трьома напрямками.

Потрібне зовнішнє навантаження визначають розв'язавши зворотну задачу пластичного деформування. Тобто в результаті розрахунку ідеального процесу формозмінювання необхідно отримати розподіл $P(x_i)$, що характеризує розподіл потрібного силового параметра. Виникає необхідність мінімізації функціоналу на сімействі кривих $F = F[P(x_i, t)]$, де t – час процесу деформування. Напрямок пошуку здійснюється градієнтним методом по $P(x_i, t)$. Похідні $F(P(x_i, t))$ по $P(x_i, t)$ визначають чисельно унаслідок багаторазового розрахунку завдання деформування.

Розрахунок оптимального зовнішнього навантаження здійснюють у такому порядку. На першому етапі задаємося полем силового впливу на заготовку. Силу впливу беремо, урахувавши наявне на підприємстві обладнання та штампове оснащення. Використовуючи чисельний метод розрахунку, наприклад метод скінченних різниць, початковий силу впливу, що прикладений до заготовки, записуємо у вигляді:

$$P_o = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^K P_{mni}, \quad (3.5)$$

де P_{mni} – приведена до вузлу mn сітки серединної поверхні заготовки зовнішня сила.

Прикладаючи початковий силовий вплив P_o до деформованої заготовки, визначаємо її деформований стан до моменту оформлення заданої конфігурації за методом скінченних різниць. За полем деформацій та швидкістю деформацій визначаємо значення цільових функцій. Завдання визначення оптимального зовнішнього навантаження полягає у визначенні мінімуму функціонала (3.5) і мінімуму цільової функції. На наступних етапах розрахунку замість мінімуму цільової функції можна використовувати квадратичний функціонал Гауса, який являє собою вираз:

$$\varepsilon(P_k) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (\varepsilon_{imn}^n - \varepsilon_{imn}^p)^2, \quad (3.6)$$

де $\varepsilon_{imn}^n, \varepsilon_{imn}^p$ – інтенсивність деформацій для ідеального та наявного процесів пластичного деформування.

За мінімізації функціоналів використовуємо метод других похідних (метод Ньютона) [3].

Значно скоротити кількість варіантів розрахунку процесу деформування можливо, якщо виразити поле деформацій через параметр, що пов'язаний із зовнішнім навантаженням.

Практично реалізувати ідеальний процес пластичного деформування можливо завдяки навантаженню осередку деформацій деякими додатковими видами зовнішніх навантажень (нормальних і дотичних). Це досягається або штампуванням з нагріванням (так звана «температурна інтенсифікація»), або унаслідок суміщених процесів («силова інтенсифікація»). Менш ефективно для цих цілей використовувати оптимізацію форми заготовки та інструменту, поліпшення мастильних матеріалів, оптимізацію передавального середовища, штампування з використанням ультразвукових коливань.

Наприклад, під час формування з диференційованим нагріванням інтенсивність швидкостей деформацій визначають за виразом

$$\dot{\varepsilon}_i(\rho) = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{v_n r_\partial}{\rho^2}, \quad (3.7)$$

де ρ – радіус поточної ділянки фланця заготовки; v_n – швидкість витягування; r_∂ – радіус деталі.

Однорідне поле швидкостей деформації забезпечується в тому випадку, коли швидкість пуансона квадратично залежить від поточного радіуса, тобто $v_n = A\rho^2$.

Інтенсивність деформацій [4] можна подати у вигляді

$$\dot{\varepsilon}_i(\rho) = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(1 - \sqrt{\frac{\lambda^2}{r_\partial^2 - R_n^2 + \lambda^2}} \right), \quad (3.8)$$

де

$$\lambda = r_\partial \left[\exp\left(\frac{T_{\text{вн}} - T_o}{T_\rho - T_o}\right) \right] \left[\frac{\varepsilon_i(r_\partial)}{\varepsilon_i(\rho)} \right]^n \left[\frac{\dot{\varepsilon}_i(r_\partial)}{\dot{\varepsilon}_i(\rho)} \right]^m,$$

де R_n – радіус зовнішнього краю фланця; $T_{\text{вн}}, T_o, T_\rho$ – температури зовнішнього, внутрішнього краю фланця та поточна.

Там же наведені залежності, що дозволяють визначити розподіл температур, що забезпечують однорідність деформацій.

Розглянемо процеси деформування осесиметричних деталей (ободи коліс, сифони, листові деталі авіаційних двигунів із трубчастих та конічних заготовок), одержуваних розтягуванням з циліндричних тонкостінних заготовок, відповідно до мінімально можливого значення роботи деформації.

Основна особливість розв'язуваної задачі полягає в тому, що в будь-якій точці деформованої ділянки деталі відомо значення однієї з головних деформацій – окружної:

$$e_\varphi = \ln \frac{r}{r_0}, \quad (3.9)$$

де r_0 – радіус заготовки – кругового циліндра; r – радіус, який визначає положення довільної точки деталі.

Для обчислення двох інших головних складових деформованого стану деталі можна використовувати умову нерозривності нестисливого матеріалу:

$$e_{\varphi} + e_s + e_{\delta} = 0, \quad (3.10)$$

де e_s – меридіальна деформація; e_{δ} – деформація по товщині деталі.

Співвідношення (3.9) і (3.10) не дозволяють визначити e_s і e_{δ} . Тому необхідно ввести певну додаткову умову, яка дозволила б або визначити одну з шуканих величин, або встановити співвідношення між ними.

Якщо поділити праву і ліву частини (3.10) на $e_{\varphi} \neq 0$, то отримаємо:

$$1 + k_1 + k_2 = 0, \quad (3.11)$$

$$k_1 = \frac{e_s}{e_{\varphi}} \Rightarrow e_s = k_1 e_{\varphi} \quad (3.12)$$

$$k_2 = \frac{e_{\delta}}{e_{\varphi}} \Rightarrow e_{\delta} = k_2 e_{\varphi} \quad (3.13)$$

Величини k_1 і k_2 залежать від способу навантаження заготовки та граничних умов і повністю визначають інтенсивність деформації а, отже, її роботу.

Інтенсивність деформації може бути визначена із співвідношення

$$e_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{\varphi} - e_s)^2 + (e_s - e_{\delta})^2 + (e_{\delta} - e_{\varphi})^2}. \quad (3.14)$$

З урахуванням (3.12) і (3.13)

$$e_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} e_{\varphi} \sqrt{1 + k_1^2 + k_2}, \quad (3.15)$$

або

$$e_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} e_{\varphi} \sqrt{1 + k_2^2 + k_2}, \quad (3.16)$$

Визначимо мінімально можливе значення e_1 :

$$\frac{de_1}{dk_1} = e_{\varphi} \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{2k_1 + 1}{\sqrt{1 + k_1^2 + k_1}} = 0.$$

Звідки

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= -0,5 \\ k_2 &= -0,5 \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

З (3.17) видно, що як інтенсивність деформації e_l , так і робота деформації, матимуть мінімальне значення унаслідок реалізації одноосового розтягування в окружному напрямку.

Вид функції

$$\frac{e_i}{e_{io}} = \frac{2}{\sqrt{3}} e_{\varphi} \sqrt{1 + k_1^2 + k_2^2} \quad (3.18)$$

показано на рис. 3.6.

На цьому рисунку показані характерні точки:

– точка a , у якій $k_1 = k_2 = -0,5$.

При цьому, як було показано,

$$e_i = e_{imin} = e_{\varphi} \quad (3.19)$$

– точка b , у якій $k_1 = k_2 = -1$. При цьому опис деформованого стану проводять на підставі гіпотези про незмінність довжини, яка утворює

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} e_{\varphi} - 1,1547 e_{\varphi}; \quad (3.20)$$

і точки c , у якій $k_1 = 1, k_2 = 0$. Для цього випадку прийнято припущення про незмінність товщини заготовки, а також справедливе співвідношення (3.20).

Будь-яка осесиметрична деталь може бути представлена як поєднання елементів – тіл обертання, утворювачами яких є однозначні функції $z = f(r)$. Приклад гіпотетичної деталі та її розподіл на елементи подано на рис. 3.7, де ab , cd , ku – частини тороїдальних поверхонь, коли утворювальна тора – окружність; bc – кільцева пластина; de – конічна поверхня; ef і fk – дві частини (поділ по f – зроблено для забезпечення однозначності функції $z=f(r)$ у межах кожної з ділянок) поверхні, отриманої обертанням щодо осі z деякої довільної лінії. Циліндричний елемент деталі на рис. 3.7 не показаний, оскільки опис процесу розтягування циліндра в циліндр – найпростіше завдання.

Розглянемо питання визначення інтенсивності та роботи деформації для окремо взятого елемента деталі (рис. 3.8). Для будь-якої точки деформованої ділянки за дотримання умови (3.20) може бути визначено значення $e_l = e_{imin}$:

$$e_{imin} = e_{\varphi} = \ln \frac{r}{r_0} \quad (3.21)$$

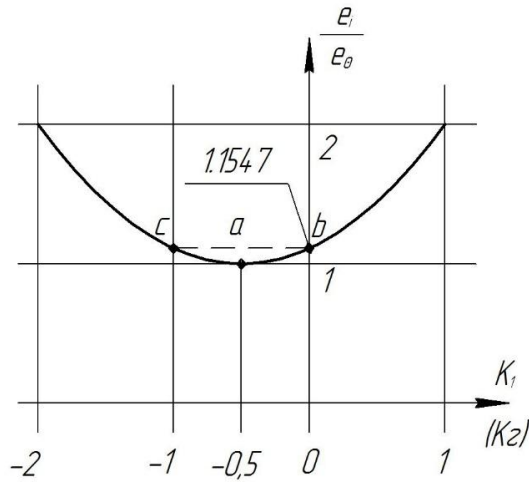


Рисунок 3.6 – Характерні точки залежності (3.18)

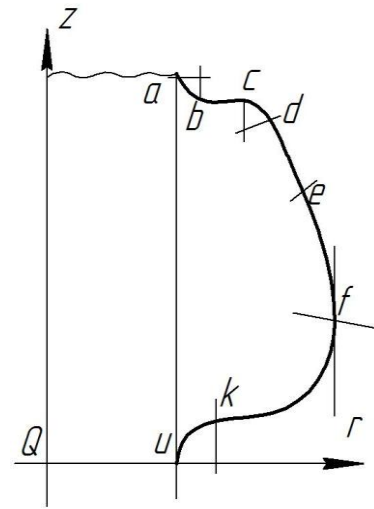


Рисунок 3.7 – Гіпотетична деталь та її розподіл на елементи

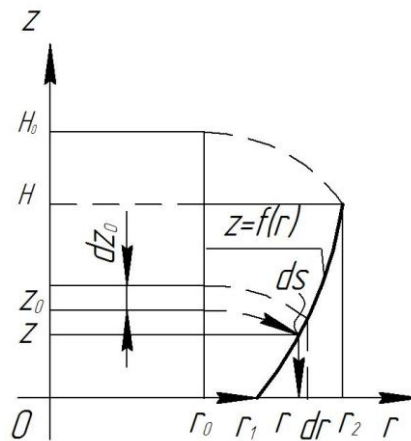


Рисунок 3.8 – Окремо взятий елемент гіпотетичної деталі

Робота деформації визначається підсумовуванням питомої роботи деформації за обсягом

$$W = \int_V \left(\int_0^{e_l} \sigma_l(e_l) de_l \right) dv \quad (3.22)$$

Для підстановки у вирази (3.21), (3.22) необхідно записати останній у вигляді функції, наприклад:

$$e_l = f(r_0; z_0), \quad (3.23)$$

і відповідно встановити вид функції:

$$r = f(z_0) \quad (3.24)$$

Для цього скористаємося умовою незмінності об'єму матеріалу деталі:

$$2\pi r_0 \delta_0 z_0 = 2\pi r \delta ds$$

$$r_0 \delta_0 z_0 = \int_s r \delta ds \quad (3.25)$$

$$ds = \sqrt{dz^2 + dr^2} = \sqrt{z^2 + 1} dr \quad (3.26)$$

За заданого вигляду функції $z = \delta(r)$ ця величина визначена.

Установимо вид функції:

$$\delta = f(r).$$

За дотримання умови (3.25), відповідно $e_i = e_{i \min}$, маємо:

$$\ln \frac{\delta}{\delta_0} = e_i = -0,5 \ln \frac{r}{r_0}.$$

звідки

$$\delta = \delta_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}}. \quad (3.27)$$

Підставляючи в (3.25) значення ds за (3.26) і δ за (3.27), отримаємо

$$r_0 \delta_0 z_0 = \int_{r_1}^r r \delta_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}} \sqrt{z^2 + 1} dr$$

або

$$\sqrt{r_0 z_0} = \int_{r_1}^r r \sqrt{z^2 + 1} dr \quad (3.28)$$

Співвідношення (3.28) дозволяє встановити залежність $r = t(z_0)$, а отже, записати (3.21) у вигляді:

$$e_{i \min} = f(r_0; z_0),$$

і скористатися співвідношенням (3.22) для визначення мінімально можливої роботи деформації:

$$W_{\min} = 2\pi r_0 \delta_0 \int_0^{H_0} \left(\int_0^{e_{i \min}} \sigma_i(e_i) de_i \right) dz_0. \quad (3.29)$$

Значення H_0 може бути встановлено за допомогою співвідношення (3.28), переписаного у вигляді:

$$\sqrt{r_0} H_0 = \int_{r_1}^{r_2} \sqrt{r} \sqrt{z^2 + 1} dr \quad (3.30)$$

Для розв'язання конкретних завдань, відшукування $W_{min \partial}$ необхідно реальну деталь розділити на прості елементи і за допомогою співвідношення (3.28) визначити $W_{min i}$ і далі простим підсумовуванням

$$W_{min g} = \sum_{i=1}^n W_{min i}, \quad (3.31)$$

де n – кількість елементів.

Ключовим моментом у розв'язанні завдання є визначення за допомогою (3.28) виду функції $r = t(z_0)$.

Розглянемо приклад перетворення циліндричної заготовки (обід колеса) та плоске кільце, конус, циліндр.

Тоді $z = t(r)$ має вигляд

$$z = (r - r_1) \cdot \operatorname{tg} \alpha = (r - r_1) \frac{H}{r_2 - r_1}. \quad (3.32)$$

Після деяких нескладних перетворень отримаємо

$$r = \sqrt[3]{\left(\frac{3}{2} \frac{z_0 \sqrt{r_0(r_2 - r_1)}}{\sqrt{H^2 + (r_2 - r_1)}} + r_1^{3/2} \right)^2}. \quad (3.33)$$

У окремих випадках:

а) у разі розтягування в плоске кільце $H=0$

$$r = \sqrt{\left(\frac{3}{2} \right) z_0 \sqrt{r_0} + r_1^{3/2}}; \quad (3.34)$$

б) у разі розтягування циліндра в циліндр $r_2 = r_1$ і (3.34) набуває вигляду:

$$r = r_1 = r_y \quad (3.35)$$

Це єдиний випадок, коли деформований стан елемента однорідний і формула для визначення $W_{min \partial}$ має вигляд:

$$W_{min \partial} = 2\pi r_0 \delta_0 H_0 \rightarrow \int_0^{e_{i \min}} \sigma_i(e_i) de_i, \quad (3.36)$$

де

$$e_{i \min} = \ln \frac{r_y}{r_0}. \quad (3.37)$$

Отримані співвідношення доцільно використовувати при виготовленні ободів коліс та деталей газотурбінних двигунів.

3.6 Життєвий цикл облицювальних деталей транспортних засобів під час виробництва та експлуатації

Для достовірного оцінювання експлуатаційної надійності та ресурсу деталі використовуються різні методики і методи розрахунку. На сьогодні моніторинг життєвого циклу виробів машинобудування здійснюють в межах системи збирання та обробки інформації, які можуть виконувати функції контролю параметрів діагностування, прогнозування, оцінювання техніко-економічного рівня і якості. Деякі автори пропонують використовувати термодинамічний підхід, за якого постулюється характерна для розглянутих процесів і реакцій незворотність ентропії як несиметричної щодо часу функції стану системи, у формі другого початку термодинаміки. Модель процесу витрачання ресурсу технічної системи враховує випадкові компоненти і адитивні поправки до детермінованого розв'язання еволюційних диференціальних рівнянь. Однак у наведених джерелах немає жодного кількісного показника, як і при синергетичному підході.

Для формування розглянутого методу розрахунку необхідно використовувати математичне моделювання технологічних процесів виготовлення деталей, початкового стану, еволюції службових параметрів, структурних перетворень, накопичення ушкоджень, відновлення та ремонту деталей, зношування деталей. Крім того доцільно доповнити метод експериментальними даними з визначення корозійної стійкості недеформованого металу.

Моделювання процесів листового штампування не викликає ускладнень. Наявні моделі процесів формоутворення ефективні та достовірні. Елемент методу розрахунку містить вихідні характеристики деталі, з якими вона надходить в

експлуатацію. Для деталей, одержуваних методами листового штампування, початковий стан визначають за такими параметрами:

$$P^o = P^o(E, \mu, \varepsilon^o, \sigma^o, K^o, \beta^o, Z_j^o, \sigma_j^o, S) \quad (3.38)$$

де P^o – параметри початкового стану; E – модуль пружності; μ – коефіцієнт Пуассона; ε^o, σ^o – залишкові напруження та деформації; K^o, β^o – параметри зміцнення; $Z_j^o, j = 1, 2, 3$ початкові розміри деталей; S – ступінь складності деталі за формою.

Елемент, що містить модель еволюції службових параметрів, передбачає такі аспекти: геометричний, міцністний, функціональний, естетичний. Геометричний параметр у такому разі, пов'язаний з корозією та ерозією деталі, а також зі зношуванням деталі унаслідок взаємодії з вантажами, що перевозяться. Міцністний аспект пов'язаний з вичерпанням несучої здатності та силових функцій.

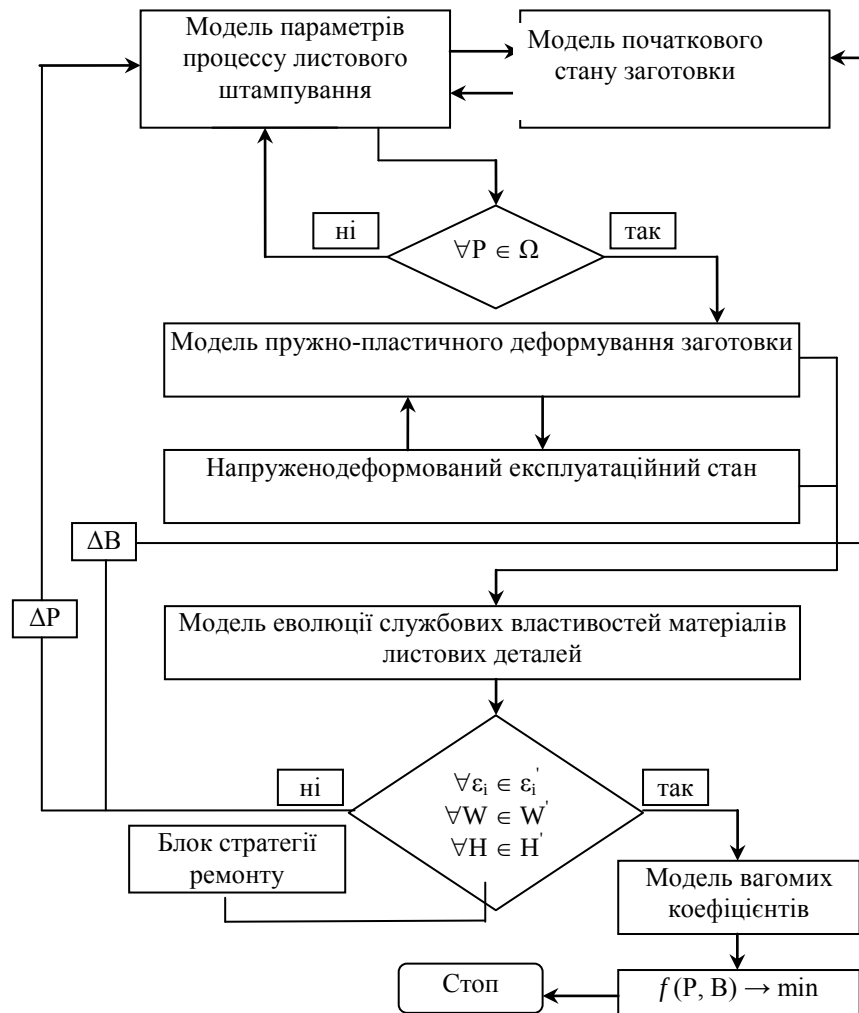
Функціональний аспект пов'язаний із втратою функціонального призначення транспортного засобу (перевезення вантажів і пасажирів). Естетичний аспект – наявність пошкоджень лакофарбового покриття, вм'ятин, тріщин й тощо.

Модель пошкоджуваності відображає дефекти в матеріалі, а саме: мікропори, мікротріщини, мікропроникнення абразивних та інших частинок, мікроподряпини, викришування матеріалу і т. д.

Еволюція службових параметрів деталей тісно пов'язана з моделлю, яка описує структурні перетворення. Опис структурних перетворень і хімічного складу матеріалу деталі унаслідок тертя та корозії має виключно важливе значення для аналізу життєвого циклу транспортного засобу.

Процес постійної зміни розмірів, а в деяких випадках і форми деталі, зумовлений моделлю зношування. Залежно від виду вантажу, що перевозять, вірогідні такі види зношування: абразивний, гідроабразивний та ударноабразивний. Найпринятніше для моделювання процесу зношування використовувати залежність, що враховує комплекс механічних й експлуатаційних характеристик зношеного матеріалу (3.1).

Для відображення в матеріалі пошкоджень, що накопичуються, використовуємо модель накопичуваних пошкоджуваностей. Заключний етап методу розрахунку пов'язаний з моделюванням тимчасового процесу експлуатації. Схема моніторингу стану деталей з урахуванням параметрів листового штампування.



ΔP – приріст параметрів листового штампування; ΔB – фізико-механічні властивості після деформації; $\Omega = \Omega(h_k, \omega, N_f)$ – службовий параметр

Рисунок 3.9 – Схема моніторингу стану деталі в процесі її виготовлення, експлуатації та ремонту

Слід зазначити, що ініціаторами та інтенсифікаторами розвитку корозійних і втомних процесів листових деталей транспортних засобів є конструктивні та технологічні недоліки. До технологічних недоліків належать такі: окалина на поверхні, грубозернисті безвуглеводні шари, висока шорсткість

поверхні, не виправна в процесі формозмінювання втрата пластичної стійкості листового металу (смуги ковзання, зосереджене потовщення, вторинні смуги ковзання, хвилястість), несприятлива схема напруженого стану листового металу під час формозмінювання. Конструктивні недоліки такі: не виправдано велика кількість зварних швів зі з'єднань, занадто малі радіуси з'єднання, поверхонь з'єднання, відхилення поверхонь від поверхні рівного опору деформування, занадто мала відстань між елементами жорсткості та інше.

У цілому пластична деформація під час формозмінювання листових деталей неоднозначно впливає на корозійну стійкість і руйнування. Пластична деформація може бути ініціатором та інтенсифікатором корозії, але може і сприятливо впливати на корозійну стійкість.

Традиційно для прогнозування життєвого циклу деталей, одержуваних методами листового штампування, використовують експериментальні методи та статистичні дані. Однак більш ефективно й менш затратно у цьому випадку, застосування методів математичного моделювання. Це сприяє найбільш точному та достовірному оцінюванню надійності деталей і безпеці їх експлуатації [27, 114–117]. Окрім того, застосування методів розрахунку дозволяє також розробити комплекс заходів щодо підвищення термінів експлуатації транспортних засобів. Розроблено метод розрахунку життєвого циклу листових деталей транспортних засобів.

Отже, проєктування, виробництво, експлуатацію та ремонт транспортних засобів необхідно проводити з урахуванням необхідної та прогнозованої довговічності. Водночас підвищення ефективності виробництва, його технічного рівня зі зниженням собівартості продукції з поліпшенням її якості, надійності й довговічності є актуальним завданням. Метою досліджень є розробка методу розрахунку життєвого циклу облицювальних деталей транспортних засобів на підставі комплексного моделювання процесів, їх виробництва, експлуатації та ремонту.

3.7 Розрахунок параметрів нових методів ремонту листових деталей транспортних засобів

Одним із завдань теорії та технології листового штампування є оцінювання впливу умов деформування на експлуатаційні показники і надійність одержуваних деталей. Реалізація величин напружень деформації та термомеханічних параметрів порушення виключають чинники, які є ініціаторами та інтенсифікаторами розвитку корозійних і втомних процесів. Пластична деформація не вирішує питання підвищення корозійної стійкості, хоча і впливає на перебіг корозійних процесів.

Високих показників корозійної стійкості досягають за спільного застосування поверхневої пластичної деформації з використанням інгібіторів корозії. Однак виготовлення деталей з листових заготовок безпосередньо унаслідок формозмінювання майже неможливе. Проте під час виготовлення листових деталей з профільних і трубчастих заготовок така можливість існує, зокрема із застосуванням способу згинання прокаткою, унаслідок волочіння крізь роликову або інструментальну філь'єру, прокачування смуги на багатовалковій машині, радіально-ротаційного профілювання. Можливі способи локального навантаження якнайкраще придатний для спільного застосування поверхневої пластичної деформації з локальним навантаженням з використанням інгібіторів корозії. Ці процеси можуть широко застосовуватися для виготовлення силових елементів конструкцій транспортних засобів, а саме: балок, коробів, стійок, дуг і т. д. Щодо виробництва листових деталей з трубчастих заготовок, цей процес освоєний і апробований під час виробництва труб для нафтогазової промисловості й може застосовуватися для виготовлення ободів коліс під час їх калібрування, труб глушників, патрубків і т. д. Найбільш суттєво корозійну стійкість підвищують інгібітори корозії, що містять поліфосфат і силікат натрію. Для штампування деталей з листа складним витягуванням широко використовують мастила для зменшення напруження контактного тертя на важкоформуєвальних ділянках заготовки. Додавання до мастильних матеріалів інгібіторів корозії, а до металоплакувальних мастил

цинку, латуні, також підвищуватиме корозійну стійкість відштампованих деталей.

Перспективним у виробництві листових деталей транспортних засобів є застосування безштампових методів формо змінювання – магнітно-імпульсного, гідродинамічного газодетонаційного штампування, а також штампування вибухом і зрідженими газами, штампування еластичними середовищами та рідкими середовищами. Серед цих методів найбільш перспективні методи обтягуванням пуансону. У цих методах облицювальна поверхня не контактує з жорстким інструментом, що виключає утворення задирань і подряпин. Вирішальними у зниженні собівартості продукції, підвищенні її ресурсів організації гнучкого виробництва є перспективні матеріали. Заміна звичайної вуглецевої сталі низьколегованою та застосування мікролегованих сталей з мікродомішками титану та ванадію дозволяє не тільки зменшити масу транспортних засобів, а й суттєво підвищити корозійну стійкість кузовних деталей. Характеристики міцності цих деталей на рівні 400, 500 або 600 МПа, порівняно з 250 МПа нелегованих сталей застосовуваних у вагонобудуванні та автомобілебудуванні. Ціна їх усього на 20 % більша, ніж ціна вуглецевих сталей.

Підвищення ефективності технології ремонту листових деталей транспортних засобів можливе завдяки вдосконаленню наявних і створенню нових ремонтних технологій цілковитого виготовлення нового елемента конструкції. Необхідним є розширення технологічних можливостей та модернізації ковальсько-пресового обладнання. Це дозволить підвищити якість ремонтних робіт, їх продуктивність та універсальність.

Відповідно до сучасної класифікації складових деталей транспортних засобів та оптимального маршруту організації проведення процесів ремонтно-відновлюваних робіт [65], рівень руйнації елементів транспортних засобів, що поділені на три групи: часткове пошкодження, пошкодження середньої складності, руйнування, незначні та середньої складності: вм'ятини, тріщини та ін. Важливим є і можливість усунення пошкоджень без демонтажу елемента

конструкції із застосуванням рихтувального устаткування. Серед цього устаткування найбільш доцільне використання магнітно-імпульсного або вакуумного. Цілком пошкоджені або зруйновані елементи конструкції підлягають цілковитому виготовленню нового листового елемента. В автомобільній промисловості зазвичай є підприємства, що виготовляють автомобілі є і виробниками достатньої кількості запасних частин кузовних та облицювальних деталей. Тому проблема їх відновлення легко розв'язується. Цілковите виготовлення листових деталей для залізничного транспорту здійснюється на спеціалізованих ремонтних підприємствах. Але для виготовлення деяких деталей необхідно застосовувати значні хитрощі, наприклад «Лист верхній шкворневої балки». Цю деталь виготовляють за допомогою послідовного штампування на кривошипному пресі з локальним підігріванням паяльної лампи осередку деформації. Деталь «Кришка люка» не було можливості виготовити на жодному ремонтному підприємстві. Ремонтний варіант цієї деталі вимагав (згідно з вимогами Укрзалізниці) використання дешевшої вуглецевої сталі – Ст. 3 замість сталі 09Г2С, з іншими механічними властивостями. Це не надало можливість виготовлення цієї деталі на вагонобудівному підприємстві за серійною технологією.

Слід зазначити, що перспективним напрямом рихтування листових деталей є використання вакууму. Розглянемо розрахунок параметрів вакуумного рихтування зі сферичною вм'ятиною.

Рівняння руху матеріалу вм'ятини сферичної форми під дією хвилі розрядження має вигляд:

$$\rho \frac{du}{dt} - \frac{d\sigma_r}{dr} + 2 \frac{(\sigma_\varphi - \sigma_r)}{r} = \frac{p_0}{\delta} \left(1 - \frac{\gamma - 1}{2} \frac{u}{c_0} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}}, \quad (3.39)$$

де ρ – щільність матеріалу обшивки автомобіля; u – швидкість частинок матеріалу вм'ятини; σ_r, σ_φ – радіальні та широтні напруження; p_0 – атмосферний тиск; δ – товщина матеріалу оболонки; c_0 – швидкість звуку повітря.

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v},$$

де c_p , c_v – питомі теплоємності при постійному тиску та об'єму.

Установлено, що зміна товщини матеріалу вм'ятини в будь-який момент часу мала. Тому можна знехтувати зміною товщини; тоді

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\beta\sigma_s}{r}, \quad (3.40)$$

де β – коефіцієнт Лоде; σ_s – межа плинності.

Окрім того, за умовою пластичності Тріска-Сен-Венана

$$\sigma_\phi - \sigma_r = \beta\sigma_s \quad (3.41)$$

рівняння (3.39) приводиться до вигляду

$$\rho_0 \frac{du}{dt} - \frac{\sigma_s}{r}(\nu - \beta) = \frac{p_o}{\delta} \left(1 - \frac{\gamma - 1}{2} \frac{u}{c_o} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3.42)$$

Ураховуючи те, що

$$\frac{du}{dt} = \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{du}{dr} \cdot \frac{dr}{dt} = \frac{du}{dr} \cdot u$$

Рівняння (3.42) набуває вигляду:

$$\rho_0 \frac{du}{dr} \cdot u - \alpha \frac{\sigma_s}{r} = \frac{p_o}{\delta} \left(1 - \frac{\gamma - 1}{2} \frac{u}{c_o} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3.43)$$

де $(\nu - \beta) = \alpha$.

Рівняння руху матеріалу вм'ятини сферичної форми, з урахуванням рівняння нерозривності $u = \dot{R} \left(\frac{R}{r} \right)^2$, де $\dot{R} = \frac{dR}{dt}$; R – радіус вм'ятин запишеться у вигляді:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - 2\beta \frac{\sigma_s}{r} = \rho_o \frac{du}{dr} u, \quad (3.44)$$

або

$$d\sigma_r - 2\beta\sigma_s \frac{dr}{r} = \rho_o u du \quad (3.45)$$

Після інтегрування отримуємо:

$$\sigma_r - p_o \left(1 - \frac{\gamma - 1}{2} \frac{u}{c_o} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} - 2\beta\sigma_s \ln \frac{R + f}{R} = \rho_o \frac{u^2}{2}, \quad (3.46)$$

де f – глибина вм'ятини.

З урахуванням умови (3.40) рівняння (3.45) перетворюється до вигляду:

$$\frac{\lambda\sigma_s}{r} = \rho_o u \frac{du}{dr}. \quad (3.47)$$

де λ – const.

Розв'язання рівняння (3.47) має вигляд:

$$2\gamma\sigma_s \ln \frac{R + f}{R} = \rho_o \frac{u^2}{2}. \quad (3.48)$$

За рівнянням (3.48) визначаємо швидкість руху частинок вм'ятини

$$u(\sigma_s, f) = \left(\frac{4\lambda\sigma_s}{\rho_o} \ln \frac{R + f}{R} \right)^{0,5}. \quad (3.39)$$

Підставляючи значення швидкості u в рівняння (3.39, 3.43), отримуємо поле напружень й швидкостей для будь-якої точки вм'ятини. Енергетичні параметри процесу можна отримати прирівнявши тиск миттєвого енерговиділення тиску в хвилі розрядження:

$$0,5\rho_e D^2 (\gamma + 1)^{-1} = p_o \left(1 - \frac{(\gamma - 1)}{2} \frac{u}{c_o} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3.40)$$

де ρ_e , D – щільність енергоносія, швидкість енерговиділення.

Розв'язання розглядаємої задачі можливо, використовуючи закон збереження енергії:

$$W + W_\phi + e = 1, \quad (3.41)$$

де e – відносна внутрішня енергія газу; W – відносна кінетична енергія вм'ятини; W_ϕ – робота пластичної деформації, кінетична енергія матеріалу вм'ятини

$$W_\phi = \frac{d}{dt} \iiint_v 0,5u^2 dv, \quad (3.42)$$

де $dv = 4\pi\rho_o r^2 dr$.

Робота деформації матеріалу в м'ятини

$$W_{\phi} = \int_0^{E_i} \sigma_i d\varepsilon_i, \quad (3.43)$$

де σ_i , ε_i – інтенсивності напружень та деформацій.

Відносна внутрішня енергія хвилі розрядження:

$$\varepsilon = \left(\frac{R}{r} \right)^{3(\gamma-1)}. \quad (3.44)$$

Спільне рішення рівнянь (3.41–3.44) дозволяє визначити швидкість переміщення внутрішньої стінки м'ятини і величину максимального прогину.

Підставивши це значення в рівняння (3.39) з урахуванням (3.41), отримаємо рівняння

$$\rho_o u du = \left[\frac{\alpha \sigma_s}{r} + \left(\frac{p_0}{\delta} \left(1 - \frac{\gamma-1}{2} \frac{u(\sigma_s; f)}{c_0} \right) \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \right] dr. \quad (3.45)$$

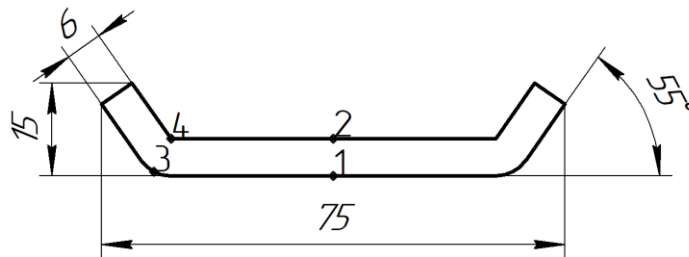
Отримуємо більш точне рішення для поля швидкостей частинок матеріалу в м'ятини

$$u_o = \frac{2}{\rho_o} \left[2\sigma_s \ln \frac{R+f}{R} + f \frac{p_0}{\delta} \left(1 - \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{u(\sigma_s, f)}{c_0} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \right]^{0.5}. \quad (3.46)$$

3.8 Математичне моделювання процесів штампування ремонтних деталей «Лист верхній шкворневої балки» та «Кришка люка»

Проблематичним є виготовлення деталей «Лист верхній шкворневої балки» та «Кришка люка» в умовах ремонтних підприємств. Не існувало обладнання для забезпечення необхідного зусилля деформування та штампувальної постілі необхідних розмірів. Для реалізації технології виготовлення цих деталей було вдосконалено процес самочинного формоутворення деталі «Лист верхній шкворневої балки» та послідовного деформування «Кришка люка». Моделювання процесу самочинного формоутворення деталей «Лист верхній шкворневої балки» за наявною та новою

схемами виконано методом скінченних елементів у системі AnSYS / AutoDYN.
Результати розрахунку з урахуванням розвантаження показані на рис. 3.10–3.26.



Контрольні точки (проби): 1 – середина зовнішнього (тильного) боку основи;
2 – середина внутрішнього боку основи; 3 – зовнішній кут вигину полиці;
4 – внутрішній кут вигину полиці

Рисунок 3.10 – Матеріал заготовки – Ст. 3

Схема 1 (наявна технологічна схема)

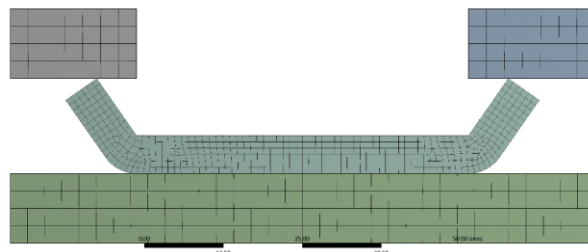


Рисунок 3.11 – Розрахункова сітка

Кількість вузлів – 825

кількість комірок – 678

ANSYS
Explicit Dynamics
Issue 20.000
04/02/2021 10:00
Fixed Support
Displacement
Velocity
Force: 1.0e+006 N

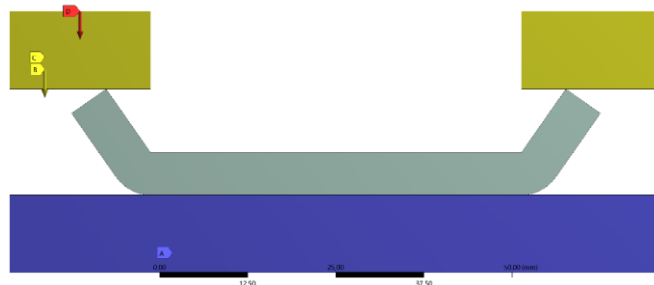


Рисунок 3.12 – Схема навантаження

Стіл: жорстка фіксація (поз. А)

Пуансон: лінійна швидкість –1000 мм/с уздовж вісі Y (вектор B);

переміщення – вільне вздовж осі Y, заборонене вздовж X (поз. C).

Зусилля: $1,6 \cdot 10^6$ Н (160 т. с.) уздовж осі Y (вектор D).

Коефіцієнт тертя між усіма компонентами – $\mu = 0$ (вільне ковзання).

Схема 2 (нова технологічна схема з нерухомими упорами)

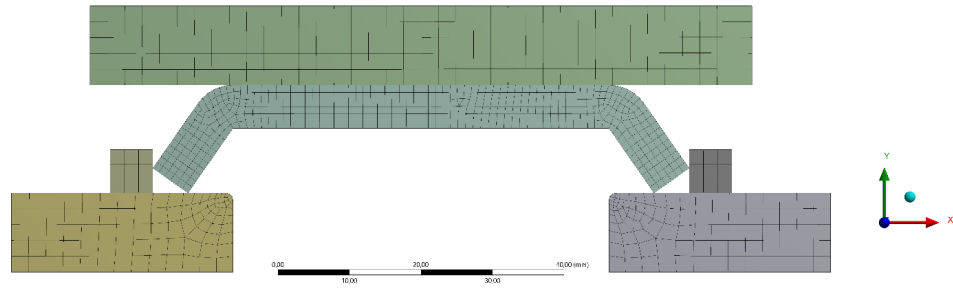


Рисунок 3.13 – Розрахункова сітка

Кількість вузлів – 1071

кількість комірок – 882

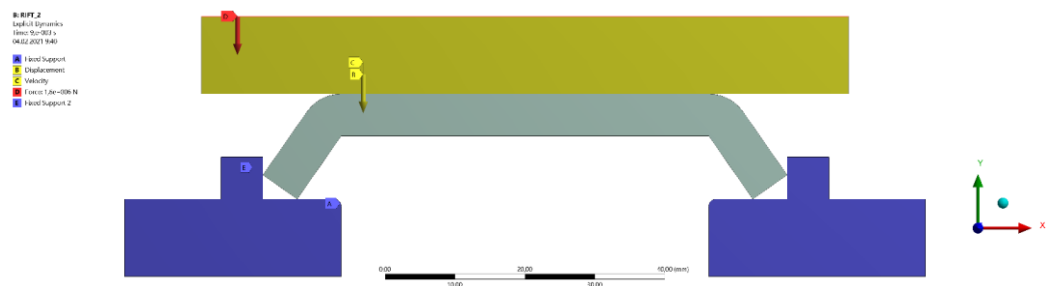


Рисунок 3.14 – Схема навантаження

Матриця: жорстка фіксація (поз. А).

Пуансон: переміщення – вільне вздовж осі Y, заборонене вздовж X (поз. В),
лінійна швидкість – 1000 мм/с вздовж осі Y (вектор С).

Зусилля: $1,6 \cdot 10^6$ Н (160 т. с.) уздовж осі Y (вектор D).

Бічні упори: жорстка фіксація (нерухомі) (поз. Е).

Коефіцієнт тертя між усіма компонентами – $\mu = 0$ (вільне ковзання).

Схема 3 (нова технологічна схема з рухомими упорами)

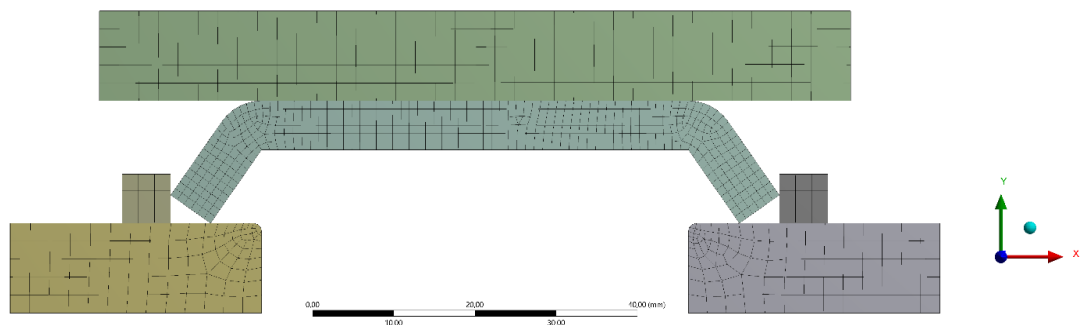


Рисунок 3.15 – Розрахункова сітка

Кількість вузлів – 1071

кількість комірок – 882

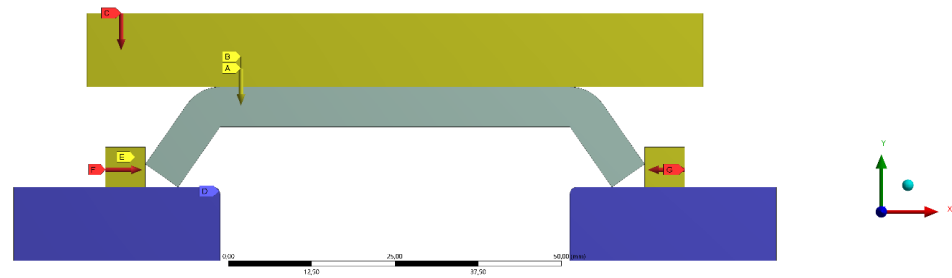


Рисунок 3.16 – Схема навантаження

Матриця: жорстка фіксація (поз. D)

Пуансон: переміщення – вільне вздовж осі Y, заборонене вздовж X (поз. A)

лінійна швидкість – 1000 мм/с уздовж осі Y (вектор B).

Зусилля: $1,6 \cdot 10^6$ Н (160 т.с.) уздовж осі Y (вектор C).

Бічні упори: вільне переміщення вздовж осі X, заборонене переміщення вздовж осі Y (рухомі горизонтально) (поз. E);

демпфувальне зусилля по бічних гранях упорів – 100 Н (вектори F, G).

Коефіцієнт тертя між усіма компонентами – $\mu = 0$ (вільне ковзання).

Схема 4 (нова технологічна схема без упорів)

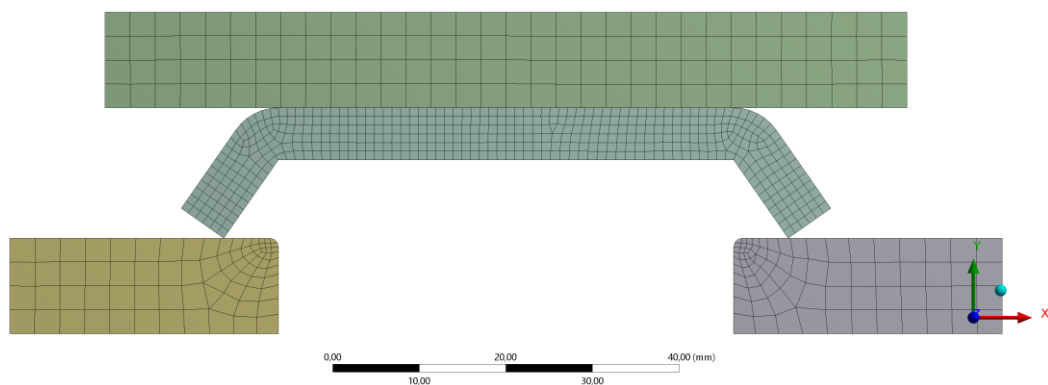


Рисунок 3.17 – Розрахункова сітка

Кількість вузлів – 934

кількість комірок – 770

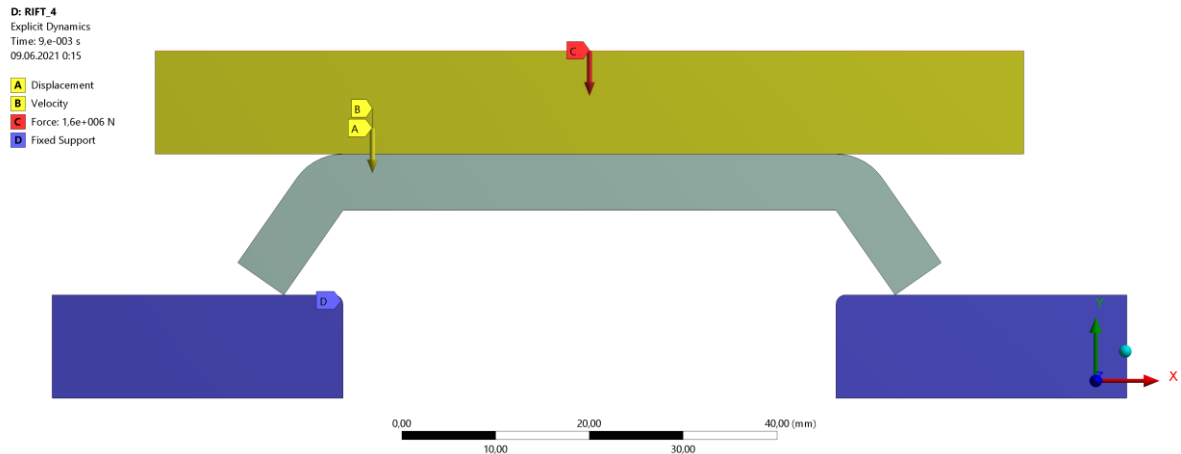


Рисунок 3.18 – Схема навантаження

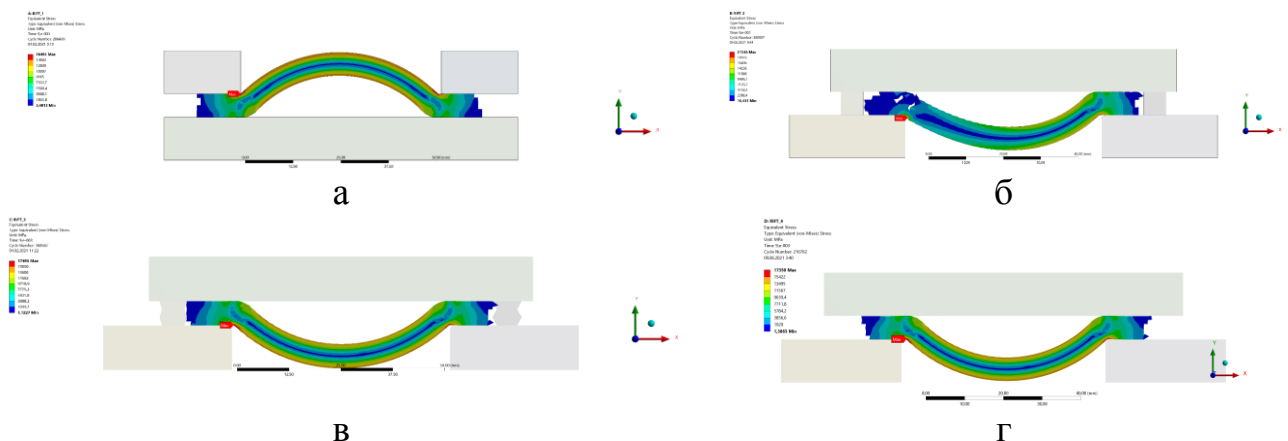
матриця: жорстка фіксація (поз. D)

пуансон: переміщення – вільне вздовж осі Y, заборонене вздовж X (поз. A)

лінійна швидкість –1000 мм/с уздовж осі Y (вектор B);

зусилля: $1,6 \cdot 10^6$ Н (160 т. с.) вздовж осі Y (вектор C);

коефіцієнт тертя між усіма компонентами – $\mu = 0$ (вільне ковзання).



а – Схема 1 (наявна технологічна схема); б – Схема 2 (нова технологічна схема з нерухомими упорами); в – Схема 3 (нова технологічна схема з рухомими упорами); г – Схема 4 (нова технологічна схема без упорів)

Рисунок 3.19 – Еквівалентні напруження (за фон Мізесом), МПа

Усі чотири схеми забезпечують майже рівні розтягувальні та стискальні напруження у відповідно зовнішньому (проба 2) та внутрішньому (проба 1) шарах матеріалу заготовки, що забезпечує рівномірність деформації та зменшує вірогідність утворення тріщин матеріалу. Порівняльні значення напружень у матеріалі заготовки наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняння значень напружень у матеріалі заготовки

Час, [с·10 ⁻³]	Схема 1 (наявна технологічна схема)			Схема 2 (нова технологічна схема з нерухомими упорами)			Схема 3 (нова технологічна схема з рухомими упорами)			Схема 4 (нова технологічна схема без упорів)		
	Мін. [МПа]	Макс. [МПа]	Середн. [МПа]	Мін. [МПа]	Макс. [МПа]	Середн. [МПа]	Мін. [МПа]	Макс. [МПа]	Середн. [МПа]	Мін. [МПа]	Макс. [МПа]	Середн. [МПа]
1,35	8,9663	2983,9	1311,4	56,303	5226,9	1086,1	7,5773	2975,3	1292,	6,3038	2953,8	1285,3
1,8	2,7971	3842,2	1758,5	94,39	5658,7	1504,5	11,846	3905,6	1753,8	4,2343	3942,7	1745,3
2,25	21,123	3873,2	1753,	83,148	7270,5	1812,5	22,487	4835,	2209,6	4,0218	5450,5	1910,
2,7	17,471	5208,6	2144,7	167,73	7664,	2124,8	22,867	6136,8	2362,5	3,2793	6497,7	2332,1
3,15	1,9645	5639,9	2593,1	126,84	8615,8	2393,7	32,894	6455,5	2410,2	5,3858	7921,4	2604,1
3,6	3,7475	6640,4	3037,9	134,06	10050	2876,4	17,951	6458,3	2805,	1,9011	7797,6	3024,1
4,05	0,98801	7082,8	3453,9	346,46	12110	3478,	25,165	7435,1	3235,9	6,1786	7666,5	3237,9
4,5	7,9264	8516,4	3644,6	145,82	10367	3971,2	38,654	8597,7	3687,8	2,8211	7897,6	3644,
4,95	6,096	8829,4	4067,4	114,23	11383	4340,2	4,3443	9299,5	4122,8	4,6519	8705,6	4089,3
5,4	0,80793	9654,3	4487,6	57,248	12493	4304,6	3,0761	10442	4559,3	22,722	9390,1	4323,5
5,85	0,57363	10387	4910,8	62,433	12918	4565,6	2,4361	10852	4980,7	2,6166	10766	4823,8
6,3	0,30423	11095	5332,1	201,43	12929	4834,8	5,0999	12191	5432,4	0,24697	10680	5237,7
6,75	0,78498	11616	5751,5	138,21	13283	5032,2	8,726	12606	5836,5	1,4333	12685	5727,4
7,2	0,1598	12353	6170,7	79,481	17057	5246,4	1,0971	13627	6266,4	1,1548	12906	6154,5
7,65	3,6551	13203	6575,1	34,051	18259	5547,7	0,4843	14381	6681,8	0,36337	13847	6598,2
8,1	0,64762	13798	6975,7	92,056	18615	5787,3	0,20334	15111	7083,8	1,0468	15106	7038,8
8,55	1,6452	14494	7379,6	150,46	19661	6077,	1,19	15657	7475,5	0,55119	15585	7456,4
9	3,4913	16494	7730,9	16,435	21346	6391,8	1,1227	17493	7797,7	1,3865	17350	7822,3

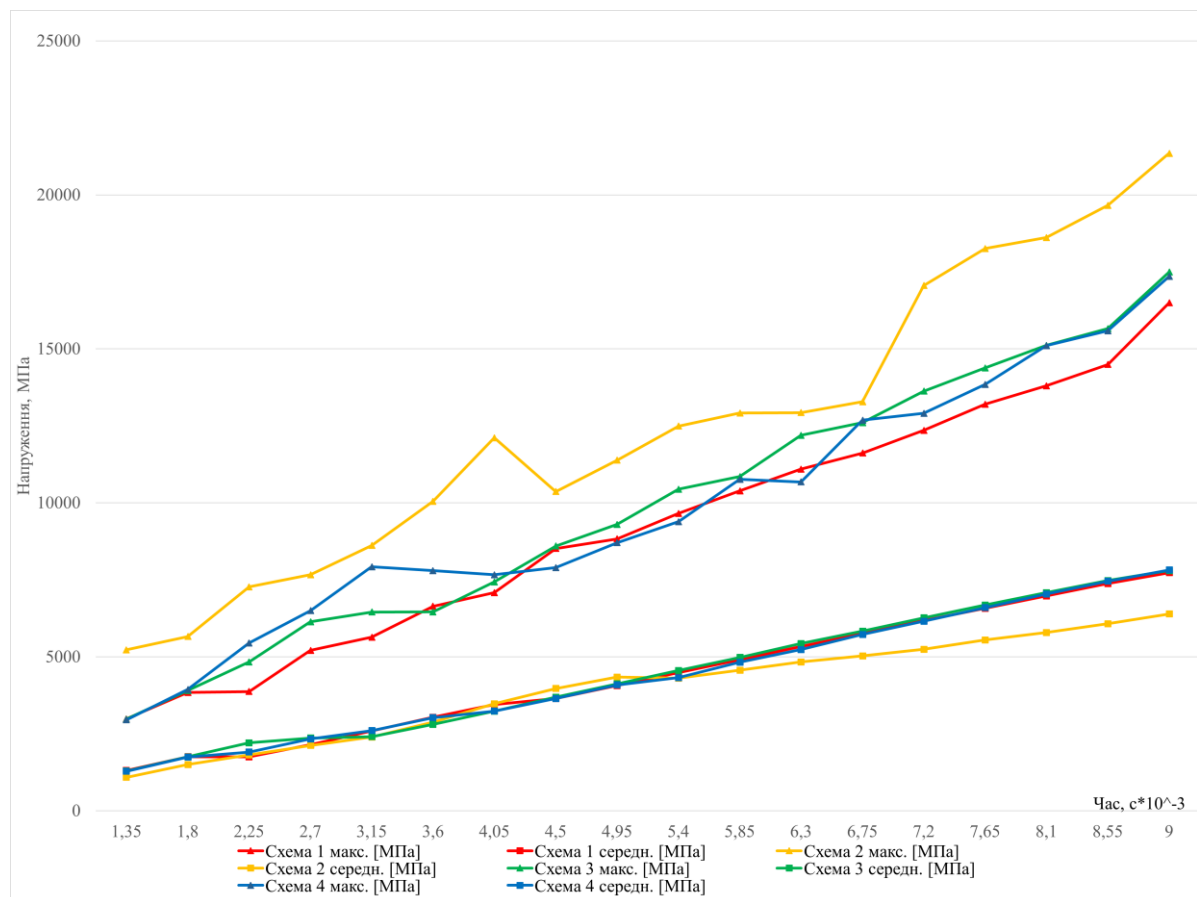
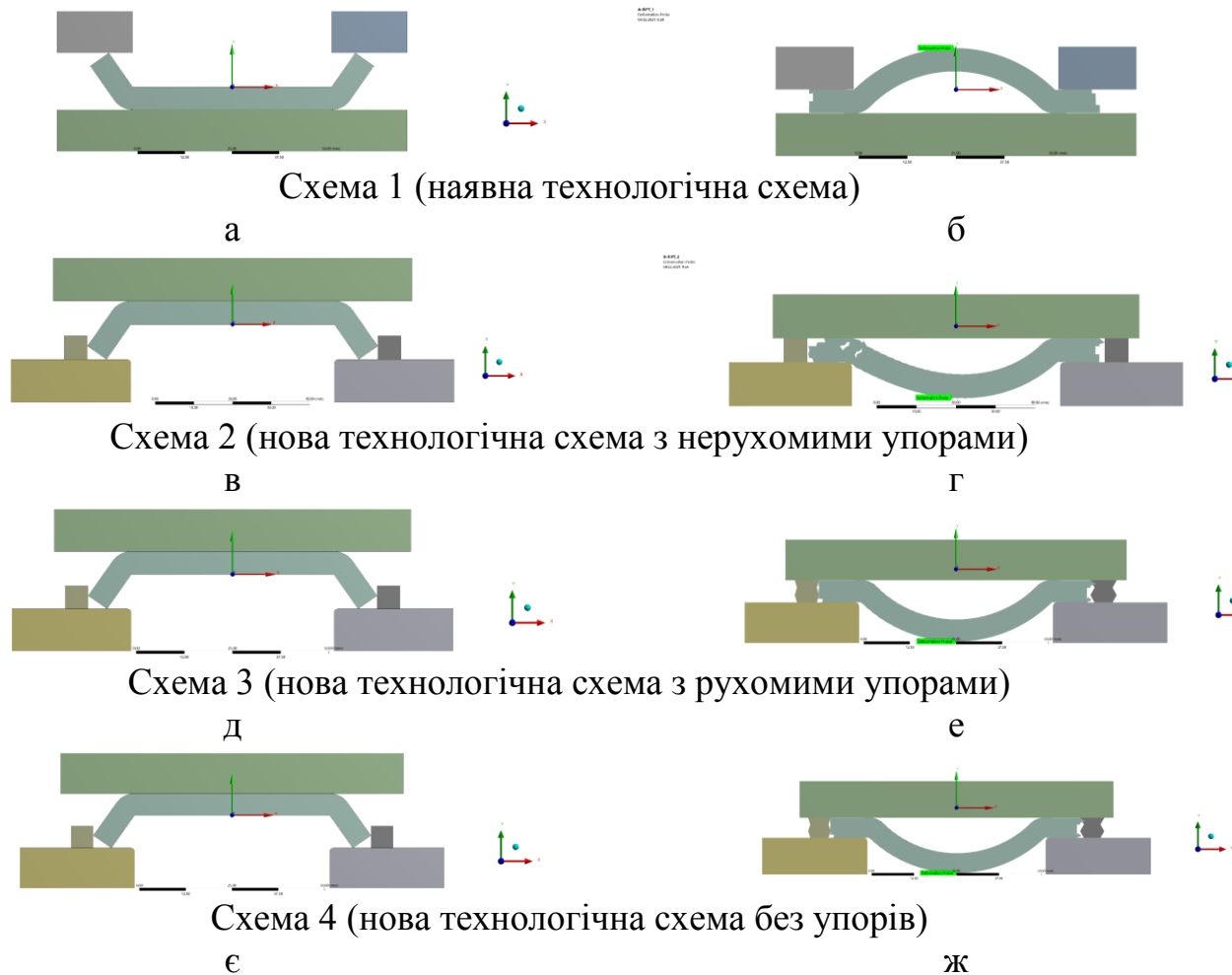


Рисунок 3.20 – Діаграма максимальних і середніх напружень

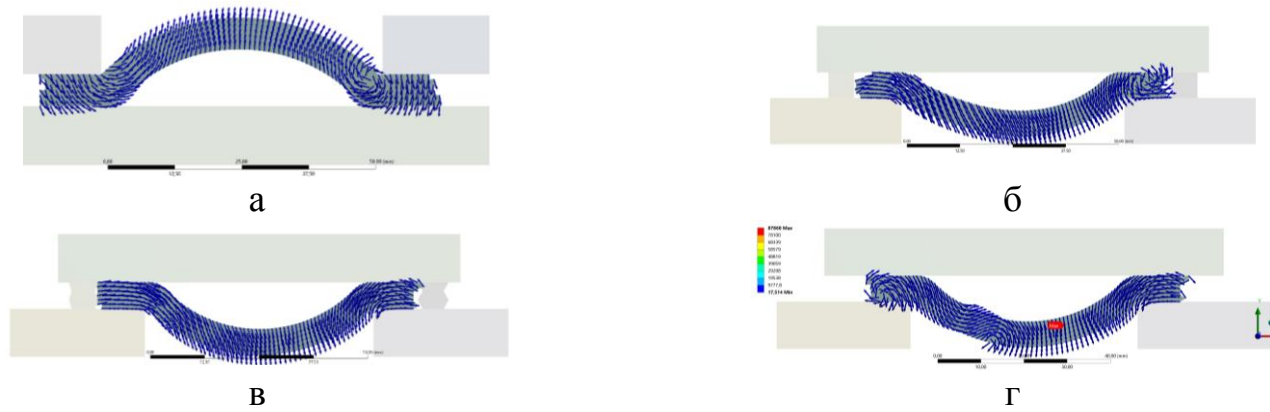
З діаграми максимальних і середніх напружень видно, що у разі нової технологічної схеми з нерухомими упорами (схема 2) максимальні середні еквівалентні напруження вищі, що може викликати зворотнє пружиніння матеріалу (пружно-пластична деформація).



а, в, д, є – точка відліку (точка 2); б, г, е, ж – остаточне положення контрольної точки (проби) відносно точки 2

Рисунок 3.21 – Максимальні прогини у зоні елемента жорсткості (рифта)

У разі наявної та нової технологічної схеми з нерухомими упорами (схеми 1 та 2) помітне зміщення розташування контрольної точки (проби) відносно осі симетрії (отримані профілі елемента жорсткості несиметричні).



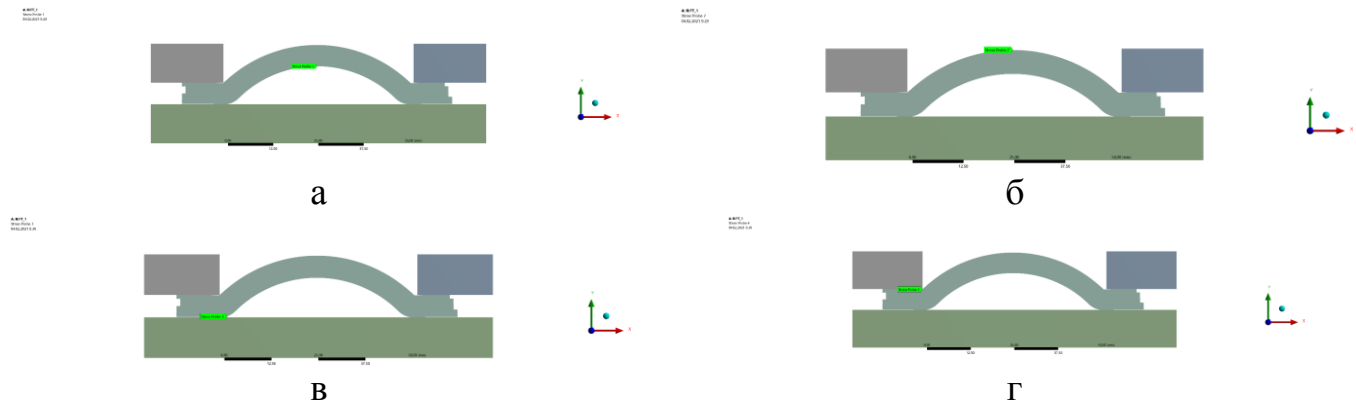
а – Схема 1 (наявні технологічна схема); б – Схема 2 (нова технологічна схема з нерухомими упорами); в – Схема 3 (нова технологічна схема з рухомими упорами); г – Схема 4 (нова технологічна схема без упорів)

Рисунок 3.22 – Вектори швидкості течії матеріалу під яас деформації, мм/с

Несиметричність деформації у разі наявної та нової технологічної схеми з нерухомими упорами (схеми 1 та 2) зумовлена утворенням суттєвого реактивного обертового моменту в кутових зонах цих схем (рисунок а, б), який виникає у ділянці згинання лише з одного боку, а з іншого відсутній. Це призводить до відхилення дуги елемента жорсткості у бік зони утворення обертового моменту внаслідок формоутворення і робить отриманий профіль рифта несиметричним.

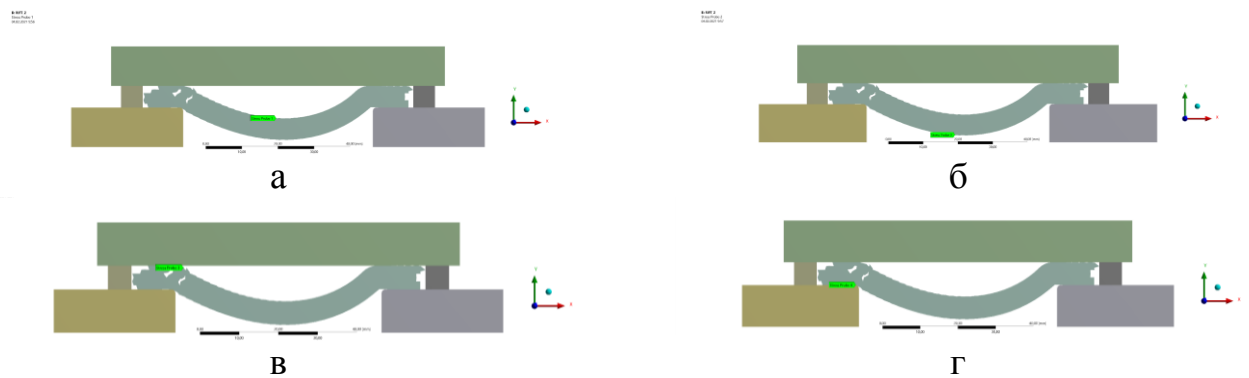
У разі формоутворення за новою технологічною схемою без упорів (схема 4) (рисунок г) вектори швидкості течії матеріалу є нерівномірними і несиметричними. Спостерігаються ділянки заготовки, на яких виникає течія матеріалу у бік, протилежний напрямку формоутворення. Така течія матеріалу заготовки може спричинити утворення на отриманому елементі жорсткості поздовжніх гофр і відхилення від потрібної форми дуги елемента.

У разі формоутворення за новою технологічною схемою з рухомими упорами (схема 3) (рисунок в) напрям векторів швидкості течії матеріалу є відносно рівномірним і симетричним. Крім того нова технологічна схема сприяє виникненню додаткових стискаючих напружень при використанні ударів (рухомих та нерухомих). Схема напруженого стану згинання зі стисканням, що сприяє більш рівномірному розподілу деформації.



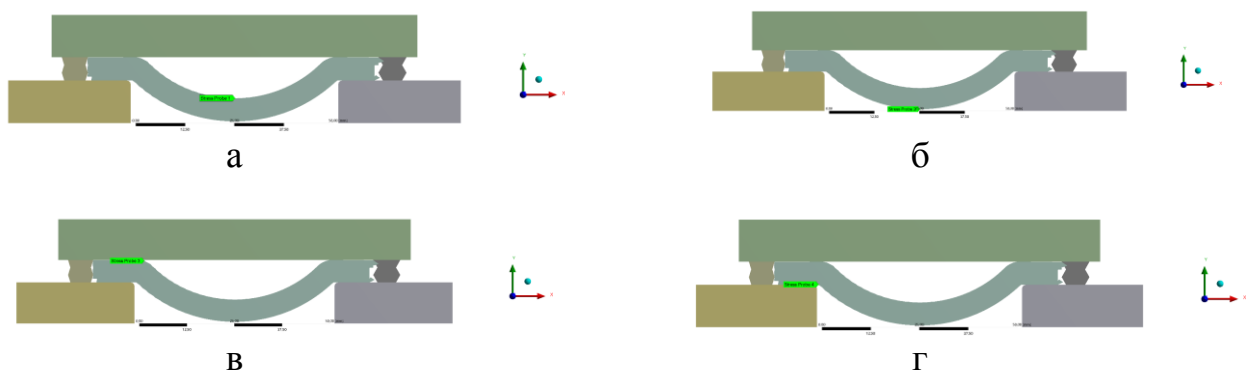
а – проба 1; б – проба 2; в – проба 3; 4 – проба 4

Рисунок 3.23 – Остаточне положення точок проб за реалізації схеми 1
(наявна технологічна схема)



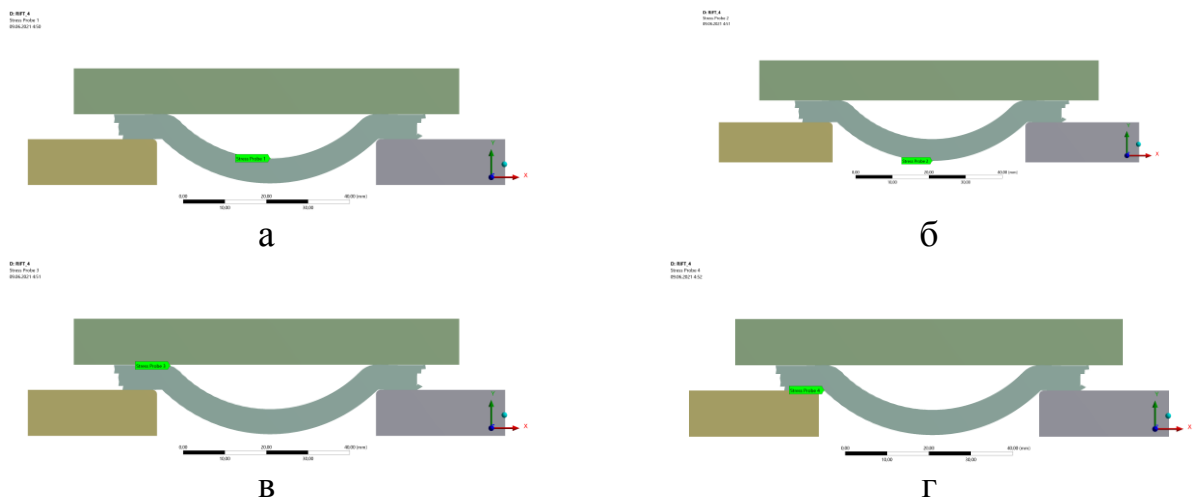
а – проба 1; б – проба 2; в – проба 3; 4 – проба 4

Рисунок 3.24 – Остаточне положення точок проб за реалізації схеми 2
(нова технологічна схема з нерухомими упорами)



а – проба 1; б – проба 2; в – проба 3; 4 – проба 4

Рисунок 3.25 – Остаточне положення точок проб за реалізації схеми 3
(нова технологічна схема з рухомими упорами)



а – проба 1; б – проба 2; в – проба 3; 4 – проба 4

Рисунок 3.26 – Остаточне положення точок проб за реалізації схеми 4 (нова технологічна схема без упорів)

Нові технологічні схеми з рухомими упорами та без упорів (схеми 3 та 4) забезпечують найбільші значення прогинів у середній зоні елемента жорсткості. Наявна технологічна схема (схема 1) забезпечує найнижче значення прогинів у середній зоні, що робить її менш технологічно ефективною за потреби виконання елемента жорсткості більшої висоти, а також може спричинити невідповідність отриманої висоти елемента жорсткості потрібній.

Таблиця 3.5 – Значення максимальних прогинів та еквівалентних напружень у точках проб

	Максимальний прогин, мм	Еквівалентні напруження (за фон Мізесом) у точках проб, МПа				
		середина основи		кутова зона		
		точка 1 (стискальні напруження)	точка 2 (розтягувальні напруження)	точка 3	точка 4	різниця
Схема 1 (наявна технологічна схема)	10,647	14453	14648	9653,8	16494	6840,2
Схема 2 (нова технологічна схема з нерухомими упорами)	17,924	12453	12097	2328,2	17729	15400,8
Схема 3 (нова технологічна схема з рухомими упорами)	19,589	14319	14496	9786,8	17493	7706,2
Схема 4 (нова технологічна схема без упорів)	19,603	14425	14528	9736,2	17350	7613,8

У разі наявної та нової технологічної схеми з нерухомими упорами (схеми 1 та 2) реактивний обертовий момент, що виникає у кутових зонах цих схем, призводить до несиметричності отриманого профілю елемента жорсткості, причому, у випадку формоутворення за новою технологічною схемою з нерухомими упорами (схема 2) різниця значень еквівалентних напружень у кутових точках проб 3, 4 сягає найбільшої величини – реактивний обертовий момент є найвищим, що спричиняє більшу несиметричність деталі.

З огляду на викладене, а також на те, що у разі формоутворення за новою технологічною схемою з рухомими упорами з докладанням до них демпфурмувального зусилля (схема 3) напрям векторів швидкості течії матеріалу є відносно рівномірним і симетричним, а значення прогину у середній зоні елемента жорсткості є найвищим, формоутворення за схемою 3 є найбільш технологічно ефективним і забезпечує найкращі параметри формоутворення.

Проведено моделювання процесу формоутворення ребер у стандартному програмному пакеті методом кінцевих елементів (МКЕ). Результати, отримані на першому етапі навантаження при загальному навантаженні, наведено на рис. 3.27 – 3.30.

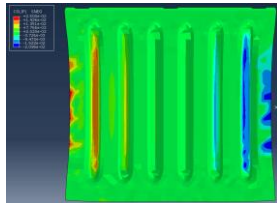


Рисунок 3.27 – Епюра переміщення заготовки у процесі деформування

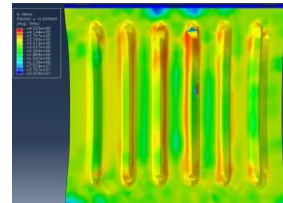


Рисунок 3.28 – Еквівалентні напруження за Мізесом

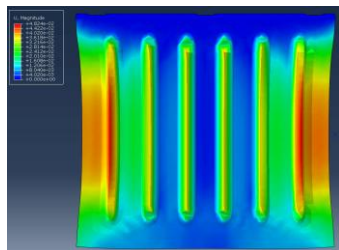


Рисунок 3.29 – Переміщення точок деталі на кінцевій стадії деформування

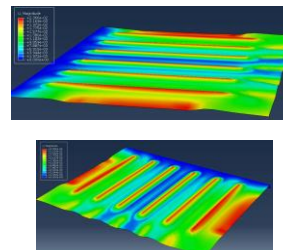
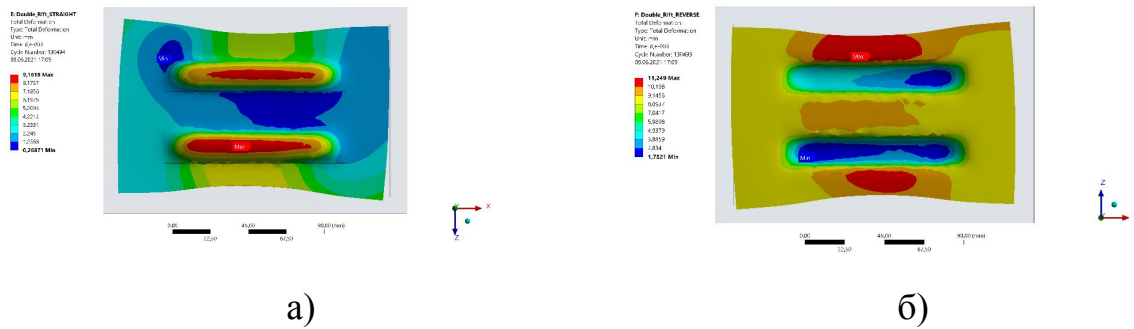


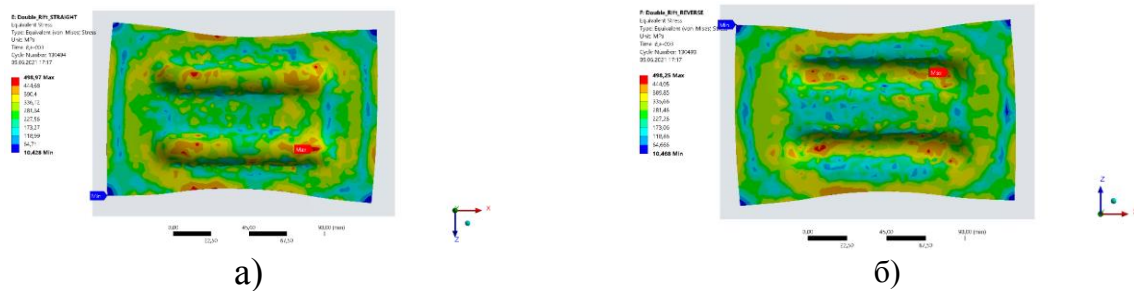
Рисунок 3.30 – Утворення гофрів у процесі формоутворення

Рис. 3.31 – 3.33 результати, отримані при послідовному навантаженні.



а – пряма схема; б – зворотна схема

Рисунок 3.31 – Епюра загальних деформацій (показано початковий контур)



а – пряма схема; б – зворотна схема

Рисунок 3.32 – Епюра еквівалентних напружень (за фон Мізесом)



а – пряма схема; б – зворотна схема

Рисунок 3.33 – Епюри деформацій уздовж вертикальної осі

За результатами моделювання процесу формоутворення деталі робочі еквівалентні напруження досягають 450 МПа, що дає підстави вважати, що в процесі формоутворення ребер можуть виникати дефекти у вигляді розривів. На вершинах центральних ребер виникають суттєві стоншення матеріалу. Товщина матеріалу на вершинах ребер становить 3,9 мм.

Зони ймовірних розривів позначені на епюрі еквівалентних деформацій та розташовуються на вершинах двох центральних ребер. На периферії деталі та між ребрами утворюються складки, що погіршує якість готової деталі і підвищує вимоги до технологічного обладнання. Для розгладження складок необхідні додаткові зусилля.

Поява складок, а також значні переміщення (до 25 мм) заготовки щодо оснащення візуально знижують якість деталі та призводять до появи затискачів, а також подряпин уздовж траєкторії ковзання.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено метод розрахунку життєвого циклу облицювальних деталей транспортних засобів, що передбачає генезис математичних моделей: формоутворення з формуванням початкових властивостей заготовки; структурних перетворень матеріалу в процесі обробки та експлуатації, еволюція службових параметрів і накопичення пошкоджень під час зношування та корозії.

2. На підставі аналізу результатів досліджень, публікацій і результатів випробувань після ремонту збільшеного обсягу, які вказують на наявність ресурсу у транспортних засобах з вичерпаним призначеним терміном служби, обґрунтована доцільність подальшого їх використання. Ресурс і рециклінг транспортної системи закладається на всіх стадіях її життєвого циклу: «вибір ділової стратегії та загальновиробничого плану», «розробка і постановка на виробництво», «виробництво», «експлуатація», «модернізація» або «утилізація».

3. Розроблено метод розрахунку параметрів зовнішнього навантаження, що забезпечує ідеальне протікання процесу пластичного деформування. Установлено, що в цьому випадку як критерій оптимізації параметрів навантаження необхідно використовувати умови, що забезпечують однорідність поля деформації та швидкостей деформацій. Найбільш раціонально реалізувати ідеальний процес пластичного деформування, використовуючи «температурну та силову інтенсифікацію процесів».

4. На підставі чисельного моделювання в програмному пакеті «ANSYS» визначено граничний тиск притискування плоских елементів заготовки із забезпеченням умов для рівного опору деформації при формуванні за кінцівки рифта також усуває бракувальні ознаки.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ФОРМОЗМІНЮВАННЯ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ У РЕМОНТНОМУ ВИКОНАННІ

4.1 Експериментальне визначення кінематичних і силових параметрів штампування зразків деталі «Лист верхній шкворневої балки»

Експериментальні дослідження виконані на гідравлічному пресі «Hydraulic shop press» зусиллям 40 т (0,4 Мн) (рис. 4.1).

Тиск вимірювався монометром, який установлений на пресі. Вимірювання переміщень пластини проводилося на спеціально сконструйованому оснащенні для вільного гнуття з використанням стандартної вимірювальної та реєстраційної апаратури. Стрілу прогину в центрі зразка виміряли контактним прогиноміром, індикатором годинникового типу, що був встановлений на нерухомій опорі з упором рухомого вимірювального стрижня в конструкцію, що досліджується.

Запис кривої «зусилля–деформація» виконано на універсальній машині типу УМЕ-10тм, що обладнана електронним силовимірювачем і діаграмним апаратом. Реєстрація деформацій виконувалася змінним тензометром.

Уточнені емпіричні залежності для розрахунку стріли прогину z і радіуса кривизни зразка $1/\rho$ для розробленого методу деформування.

Процес поетапного деформування пластини з попередньо вигнутими полками зображено на рис. 4.1.

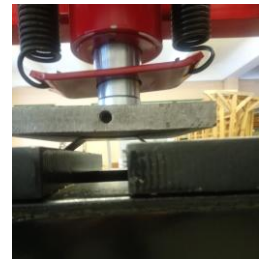
У результаті експериментальних досліджень установлено, що стріла прогину зразка в основному залежить від попереднього кута відгину полоч, товщини пластини та відношення геометричних розмірів пластини a/b , де a – довжина, b – ширина. Але для ремонту використовують профілі різних товщин залежно від типу вагона (електропотяг, пасажирський потяг), тому вплив зміни товщини слід урахувати. Співвідношення геометричних розмірів фіксоване.



а)



б)



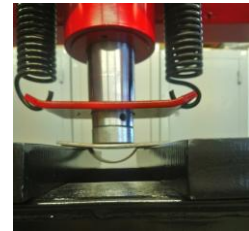
в)



г)



д)



е)

а) гідравлічний прес; б) заготовки після вигинання та самочинного деформування; г), д), е) етапи деформування

Рисунок 4.1 – Процес деформування пластин

Деформувальний стан під час вигинання досліджували методом поділених сіток. Найбільшій деформації піддається центральна частина пластини, що вигинається.

Виконано порівняння зусиль деформування під час розгинання полок прямокутної заготовки та формування рифта (рис. 4.2). Зусилля гнуття в 1,5–2,5 раза менше, ніж зусилля формування.



Рисунок 4.2 – Оснащення та вимірвальна апаратура для вимірювання стріли прогину в центрі випробуваної пластини

Момент, що діє на деформований елемент заготовки має вигляд:

$$M = \int_0^{\varphi} a \cdot \cos \varphi d\varphi + \mu P \int_0^{\varphi} a \cdot \cos \varphi d\varphi = Pa(1 - \mu) \cdot \sin \varphi$$

Зусилля деформації визначаємо з виразу:

$$P = \frac{M}{a(1 - \mu) \sin \varphi}$$

Пружно-пластичний момент має вигляд:

$$M = \left\{ 1,5 - 2r^2 \left(\frac{\sigma_s}{E} \right)^2 + \left[\frac{1}{r} + 3 \frac{\sigma_s}{E} - 4r^2 \left(\frac{\sigma_s}{E} \right)^3 \right] \frac{k_0}{2} \right\} W \sigma_s$$

де M – згинальний момент; r – радіус згинання; σ_s – межа текучості; E – модуль пружності; W – момент опору.

$$k_0 = \frac{B}{\sigma_s},$$

де B – модуль зміцнення.

У результаті експериментальних досліджень було досягнуто зниження зусилля гнуття в 1,19–1,6 рази. Матило між столом випробувальної машини та згинальною пластиною не застосовувалося.

Унаслідок обробки результатів експериментальних даних методами математичної статистики (ГОСТ 8.207-86) підтверджується нормальність розподілу результатів експерименту.

4.2 Метод визначення експлуатаційної довговічності пластично-деформованих листових деталей

Листові деталі для повітряного та наземного транспорту суттєво відрізняються від деталей загального і галузевого призначення насамперед тим, що їх конструкція та експлуатаційні характеристики враховують особливості процесів пластичного формозмінювання та деформаційного зміцнення. Основною тенденцією під час формоутворення та зміцнення пластичним деформування деталей є використання особливостей і закономірностей процесу пластичного деформування. Це пов'язано з тим, що надійна та безпечна

експлуатація деталей транспортних засобів значною мірою визначається властивостями та структурою матеріалів вихідних заготовок і формованих у процесі пластичного деформування. Щодо забезпечення максимальної або прогнозованої довговічності деталей, то пластично–деформовані параметри технологічного процесу повинні забезпечувати максимальне або очікуване збільшення межі витривалості, порівняно з вихідним значенням деталі перед зміцненням поверхневим пластичним деформуванням або заготовки після пластичного формозмінювання. Відповідно до сучасних уявлень теорії механіки пластичної деформації, оптимізація процесу має два аспекти: фізичний та технологічний [96].

Фізичний – пов’язаний з формуванням параметрів оптимізації, технологічний – із забезпеченням параметрів і умов пластичного формотворення або поверхневого деформування.

Фізичний сенс граничних рівномірних деформацій – це критична інтенсивність деформацій як за одноосової відстані, так і за інших способів деформування та формозмінювання. На підставі цього розроблено метод визначення експлуатаційної довговічності пластично оброблених деталей. Апробації методу проведені на дисках ободів коліс транспортних засобів, одержуваних методом радіально ротаційного профілювання, суть якого полягає у тому, що плоскі стандартні зразки з матеріалу ободів коліс піддавали або обтисненню, або розтягуванню до деформацій відповідним граничним рівномірним і деформаціям 5 %, 10 %, 20 %, 30 % відповідно. Далі проводилися втомні багатоциклові випробування (жорстка схема симетричного консольного вигинання). За даними випробувань будувалися криві втоми й імовірнісні криві розподілу циклічної довговічності [96]. Максимальну циклічну довговічність мають зразки, які деформуються унаслідок деформацій, що відповідають граничним рівномірним, що відповідає максимальному терміну експлуатації ободів коліс.

Для визначення експлуатаційної довговічності конкретного обода проводять розрахунок деформованого стану обода колеса при радіально-

ротаційному профілюванні або використовуються експлуатаційні дані з визначення інтенсивності деформацій обода колеса [96]. Зокрема для визначення напружень і деформацій можна використовувати метод визначення напружень щодо розподілу твердості [96]. За мінімальними деформаціями за ймовірнісною кривою розподілу циклічної довговічності визначаємо експлуатаційну довговічність обода колеса.

У результаті досліджень розроблено комплекс заходів щодо збільшення та прогнозування довговічності ободів коліс, зниження їх металоємності та уточнені критерії оптимізації процесу формозмінювання листових деталей.

Розроблено експериментально-аналітичний метод визначення ресурсу ободів коліс транспортних засобів. Найбільшу втомну міцність мають деформовані або зміцнені пластичним деформуванням матеріали до деформацій, що дорівнюють гранично рівномірним (см. 3.2). Після розрахунку інтенсивності деформації у найбільш деформованій ділянці ободу колеса за залежністю $N = f(\varepsilon_i)$ визначаємо ресурс ободу колеса. Вибір найбільш ефективної схеми напруженого стану для отримання деталей з високою експлуатаційною надійністю здійснюються напівемпіричним підходом, що заснований на екстраполяції деформації з послідовним навантаженням заготовки, використовуючи залежності:

$$Z = Z^0 \left(1 - \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_i} \right), \text{ коли } \varepsilon_p < \varepsilon_i \qquad Z = Z^0 \left(1 - \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_p} \right), \text{ коли } \varepsilon_p > \varepsilon_i,$$

де Z, Z^0 – довговічність деформованої та недеформованої деталі.

4.3 Визначення переміщень і деформацій під час розгинання полиць на гідравлічному пресі TS0500-6

За прийнятою схемою навантаження уважалося, що випробуваний зразок є балкою, шарнірно опертої по кінцях, до яких накладені згинальні моменти. Краї можуть повертатися навколо однієї з осей та переміщатися назустріч один одному.

Під час обробки показань прогиномірів переміщення точки визначається за формулою:

$$f = k(c_1 - c), \quad (4.1)$$

де $c_1 - c$ – різниця відкликів по шкалі до та після прикладення навантаження;
 k – ціна поділки шкали.

Обробка дослідних даних за вимірами прогинів і взаємного переміщення опор здійснювалася методом планування експерименту та дозволила отримати рівняння регресії для розрахунку стріли прогину z .

Дослідження проводилися на пластинах зі сталі Ст. 3 з розмірами $a = 90$ мм, $b = 40$ мм; $a = 90$ мм, $b = 20$ мм і товщиною $s = 1$ мм, 1,5 мм, 2 мм, 3 мм. Розміри пластин геометрично подібні деталі «Лист верхній шкворневої балки», що штампується, коефіцієнт подібності $m = 3,3 \div 10$.

Рівняння регресії можна подати у вигляді квазілінійної функції

$$y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (4.2)$$

де $y - z$ – стріла прогину; b_0 – вільний член, що дорівнює відклику при $X_1 = X_2 = 0$; b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти регресії; X_2 – кути відгину полиці; X_1 – товщина пластини.

Матриця планування експерименту наведена у таблиці:

Таблиця 4.1 – Матриця планування експерименту

Номер варіанту	Фактори						
	Допоміжна змінна $\bar{X}_o$	Планування		Розрахунок $X_1 \cdot X_2$	Вихід		
		X_1	X_2		y_1	y_2	y_3
1	+	-	-	+	6,8	6,92	6,73
2	+	+	-	-	8,01	8,05	7,92
3	+	-	+	-	11,02	10,95	10,98
4	+	+	+	+	15,15	15,12	15,23

Рівняння регресії після розрахунків набуває вигляду:

$$z = 10,23 + 1,34X_1 + 2,84X_2 + 0,725X_1 \cdot X_2$$

Методика експерименту полягала в тому, що: попередньо на досліджуваних зразках відгинали полки по 40 мм з кожного боку, при чому кути відгинання полиць β для кожної партії пластинок були такі: 45° , 75° ($\pi/4$, $5\pi/12$) (рис. 4.2).

Потім зразок встановлювали на стіл випробувальної машини і проводили розгинання раніше загнутих протилежних кінців пластин (рис. 4.2).

При цьому реєстрували зусилля згинання за показаннями силовимірювача випробувальної машини та стріли прогину в центрі зразка за допомогою контактного прогиноміра. Дані експерименту наведені в додатку 1.

Результати експериментальних досліджень показали, що стріла прогину зразка переважно залежить від таких чинників: попереднього кута згинання полиць; товщини пластини та відношення геометричних розмірів пластини a/b (рис. 4.3).



Рисунок 4.3 – Партія досліджуваних зразків після деформації

Для оцінювання можливості використання отриманої лінійної моделі було визначено значення коефіцієнту регресії. Оскільки коефіцієнти b_1, b_2, b_3 виявилися значимими для довірливої вірогідності 96%, то їх треба враховувати. Тому інтервал кута вигинання полиць було вибрано в діапазоні $60^\circ \div 75^\circ$ ($\pi/3$, $5\pi/12$). Отримані при проведенні експерименту значення y_1, y_2, y_3 занесені в табл. 4.2; 4.3.

Таблиця 4.2 – Результати вимірювань

Пор. №	β	1	2	3	$\bar{y}$
1	(1) ($\pi/3$)	6,95	6,89	7,01	6,95
2	(1) ($5\pi/12$)	10,37	10,42	10,50	10,43
3	(1,5) ($\pi/3$)	8,0	7,67	7,93	7,87
4	(1,5) ($5\pi/12$)	12,03	11,92	12,11	12,02

Таблиця 4.3 – Оцінка кількісного розкидування параметрів експерименту

Пор. №	Δy			Δy_i^2			S_y^2	$S(y)$	$K\%$
1	0	-0,06	0,06	0	$36 \cdot 10^{-4}$	$36 \cdot 10^{-4}$	0,0051	0,073	$2,59 \cdot 10^{-5}$
2	0,05	0,01	-0,07	$25 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$	$49 \cdot 10^{-4}$	0,0071	0,07	0,00375
3	-0,13	0,2	-0,05	0,0169	0,04	0,0025	0,014	0,18	0,0297
4	-0,04	0,1	-0,09	0,0001	0,01	0,0081	0	0	0,0091

Для здійснення всіх статистичних перевірок і визначення можливостей описання факторної залежності лінійними моделями знайдемо середні арифметичні значення виміряного параметра результатів усіх дослідів $\bar{y}$, дисперсію S_y^2 , середньоквадратичне відхилення S_y , коефіцієнт варіації $k_{вар}$, коефіцієнт кореляції та довірчий інтервал у всіх групах масиву результатів кожної серії дослідів. Рівняння регресії має вигляд:

$$y = 9,24 + 1,91X_1 + 0,628X_2 + 0,1675X_1X_2$$

Далі визначено дисперсію середнього значення, яка дорівнює: $S^2(\bar{y}) = 0,00325$ дисперсії коефіцієнтів регресії $S^2(b_i) = 0,0008125$. Помилка коефіцієнту регресії $S(b_i) = 0,029$. Число ступенів вільності $f = 12$. Величина довірчого інтервалу буде $0,0063$. Розрахунок значимість коефіцієнтів регресії для довірчої вірогідності 95% показав, що вони є значимими. Лінійна апроксимація не можлива.

Визначимо радіус кривизни унаслідок вільного вигинання з урахуванням того, що деформована поверхня може бути апроксимована багаточленом (рис. 4.4), ступінь якого на два порядки вища бажаного порядку апроксимації кривизни [118].

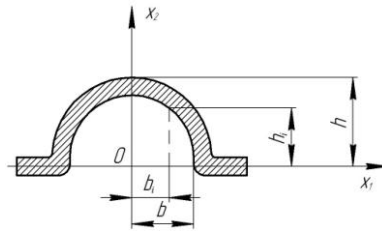


Рисунок 4.4 – Розрахункова схема процесу вільного вигинання

Рівняння поверхні з достатньою точністю можна апроксимувати парним багаточленом четвертого порядку:

$$x_2 = a + c_1 x_1^2 + c_2 x_1^4 \quad (4.2)$$

при $x_1 = 0$; $x_2 = h$;

при $x_1 = b$; $x_2 = 0$;

при $x_1 = b_i$; $x_{2i} = h_i$.

де b_i та h_i – координати проміжної точки в даному інтервалі $x_2 = 0$ та $x_2 = h$.

З рівняння (4.2) визначаємо

$$a = h;$$

$$c_1 = \frac{h_i - h}{b_i^2} - \frac{b^2(h_i - h) + b_i^2 h}{b^2(b_i^2 - b^2)};$$

$$c_2 = \frac{b^2 h_i - b^2 h + b_i^2 h}{b^2 b_i^2 (b_i^2 - b^2)} = \frac{b^2(h_i - h) + b_i^2 h}{b^2 b_i^2 (b_i^2 - b^2)}.$$

Радіус кривизни в довільній точці $i(x_1, x_2)$ перетину збігається з радіусом кривизни утворюваної.

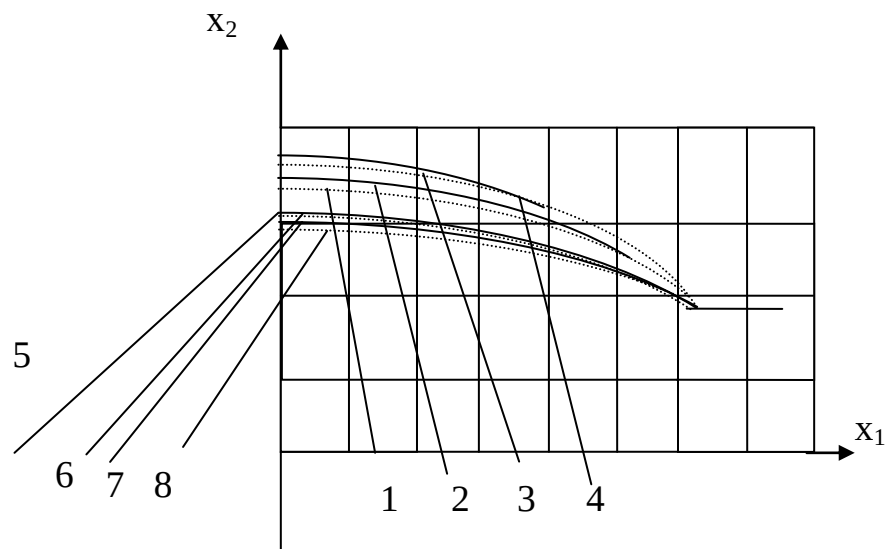
$$R = \frac{\left[1 + (2c_1 x_1 + 4c_2 x_1^3)^2\right]^{3/2}}{2c_1 + 12c_2 x_1^2}.$$

На рис. 4.5 наведені порівняльні результати експериментальних даних і чисельних розрахунків для пластин з розмірами $a = 90$ мм, $b = 40$ мм, $s = 1,5$ мм та $a = 90$ мм, $b = 20$ мм, $s = 1$ мм. Форма одержуваної заготовки, радіус кривизни, стріла прогину близькі до розрахункових залежностей.

Напружено-деформований стан заготовки під час вигинання вивчався методом ділільних сіток, нанесенням рисок на пластинки механічним способом,

а саме – інструментальним мікроскопом типу УІМ-21, з кроком 2 мм. Мікроскоп забезпечувався пристосуванням, який вдягається на об'єктив і складається з тубуса й алмазного наконечника. Об'єктив опускався до зіткнення алмазного наконечника з полірованою поверхнею зразка та на мембрану містився вантаж. Розкреслення досліджуваної зони проводилося рухом столу за допомогою мікрометричних гвинтів. Вимірювання елементів сітки до деформації та після проводилося також на інструментальному мікроскопі.

Паралельно з експериментальними роботами проведені комп'ютерні дослідження за допомогою методу скінченних елементів, реалізованого в розробленій програмі та програмному комплексі ANSYS. Під час розробки програми була можливість зв'язати координати вузлів ділильної сітки з звичайною елементною та коригувати коефіцієнти мультиплекс-елементів за результатами експериментальних даних.



- 1 – апроксимація багаточленом четвертого порядку, $a/b = 2,5$, $s = 1,5$ мм;
 2 – експеримент, $a/b = 2,5$, $s = 1,5$ мм; 3 – апроксимація багаточленом четвертого порядку, $a/b = 4,5$, $s = 1,5$ мм; 4 – експеримент, $a/b = 4,5$, $s = 1,5$ мм;
 5 – апроксимація багаточленом четвертого порядку, $a/b = 2,5$, $s = 1$ мм;
 6 – експеримент, $a/b = 2,5$, $s = 1$ мм; 7 – апроксимація багаточленом четвертого порядку, $a/b = 4,5$, $s = 1$ мм; 8 – експеримент, $a/b = 4,5$, $s = 1$ мм

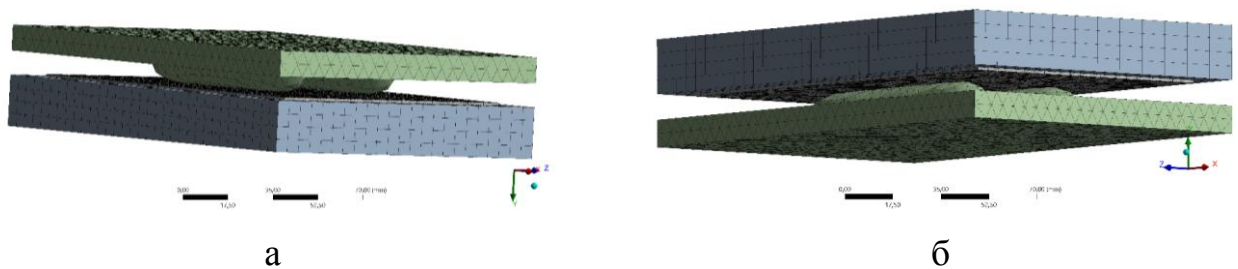
Рисунок 4.5 – Порівняння остаточних профілів деталей

У програмному пакеті ANSYS використання квадратної сітки неможливо, оскільки у стандартному пакеті використані двовимірні симплекс-елементи. Для того, щоб границі елементів були паралельні координатним осям, необхідно застосовувати мультиплекс-елементи, які використовують поліноми з членами вищого порядку. Під час моделювання у стандартному пакеті вузли ділильної сітки розглядають як опорні точки для звичайної елементної сітки.

На рис. 4.6–4.16 зображені вектори напрямку переміщень звичайних елементних вузлів заготовки, схема нумерації точок проб переміщень, поле деформацій та положення точок проб після деформації.

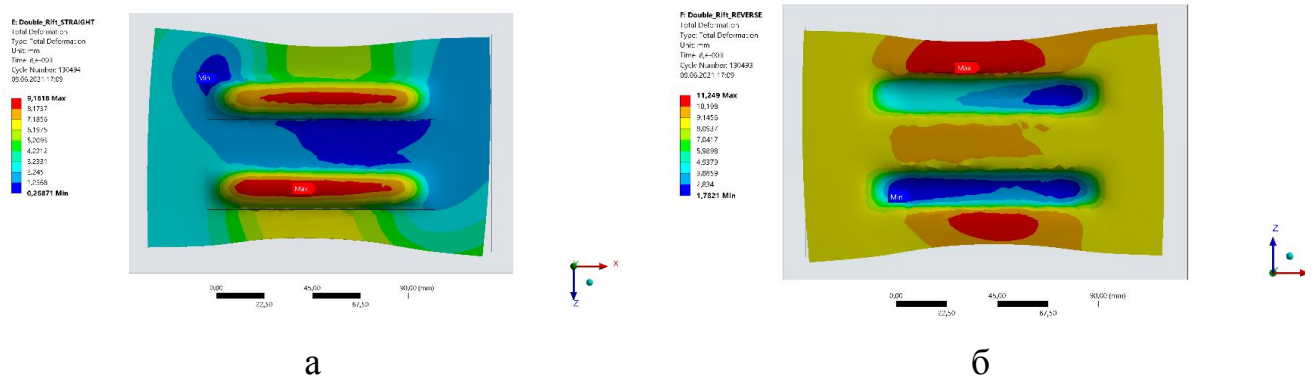
Параметри штампування: зусилля штампування – 10000 Н (вектор С); швидкість зміщення пуансона – 1000 мм /с (вектор В).

Параметри розрахункової сітки: кількість вузлів – 9768; кількість комірок – 21938.



а – пряма схема; б – зворотна схема

Рисунок 4.6 – Сіткове розбиття



а – пряма схема; б – зворотна схема

Рисунок 4.7 – Епюра загальних деформацій (показано початковий контур)

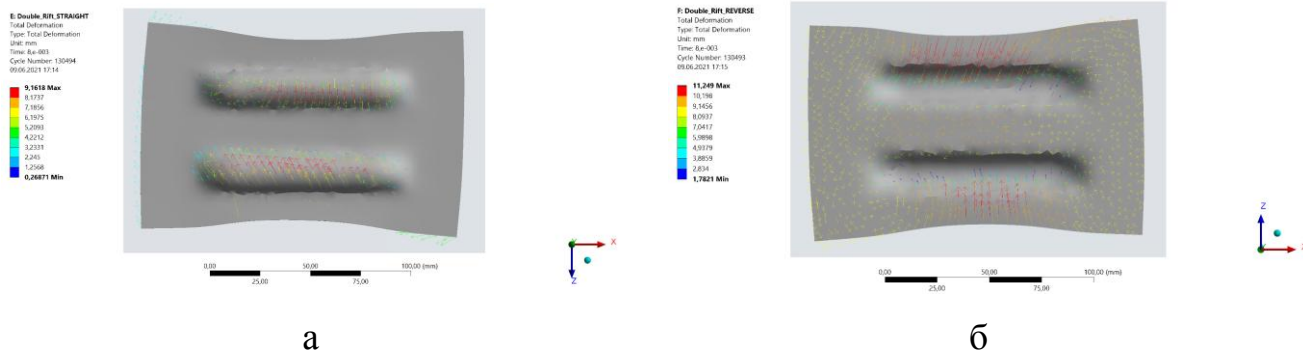


Рисунок 4.8 – Епюра напрямків течії матеріалу

У випадку реалізації прямої схеми характер течії матеріалу носить більш локалізований характер, що може привести до локального потоншення матеріалу заготовки та ризику утворення тріщин на ділянках, розташованих біля утворюваних елементів жорсткості. У випадку реалізації зворотної схеми течія матеріалу охоплює весь обсяг матеріалу заготовки.

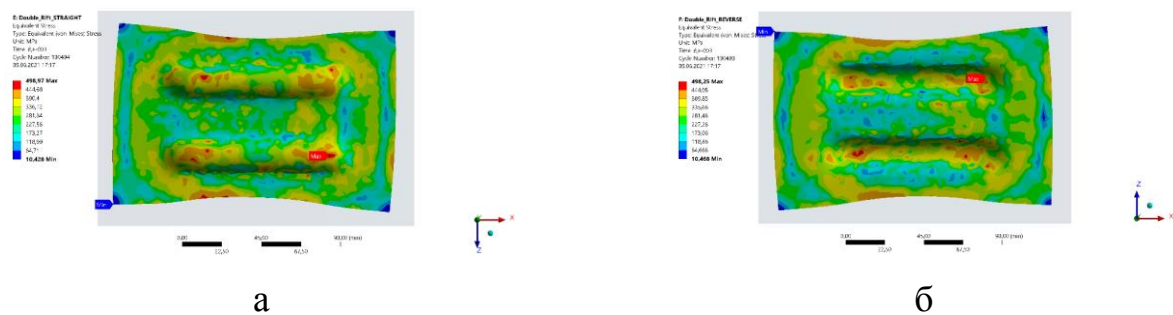


Рисунок 4.9 – Епюра еквівалентних напружень (за фон Мізесом)

З наведених діаграм видно, що обидві схеми забезпечують приблизно рівні величини залишкових напружень.

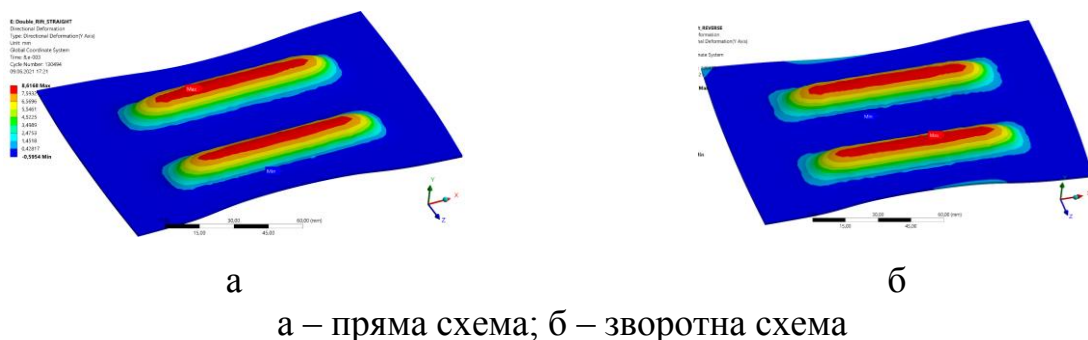
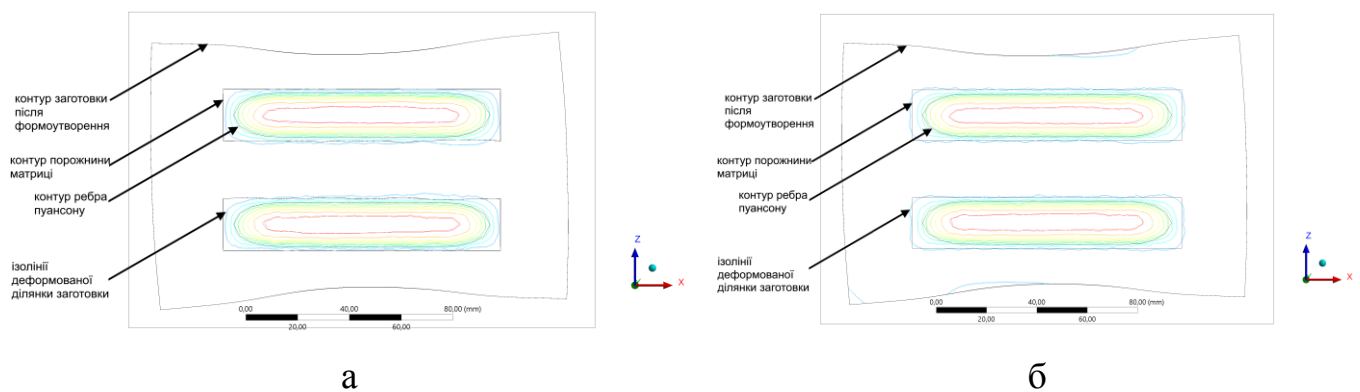


Рисунок 4.10 – Епюри деформацій вздовж вертикальної вісі

Зворотна схема формоутворення елементів жорсткості забезпечує більшу висоту отримуваних елементів порівняно з прямою схемою при однакових вихідних силових параметрах та геометрії штампового оснащення. Зважаючи на це, та на характер течії матеріалу, можна зробити висновок, що зворотна схема забезпечує кращі геометричні параметри та властивості матеріалу отримуваної деталі та є більш технологічно ефективною.

Як видно з отриманих епюр деформацій, у випадку прямої і зворотної схем утворення елементу жорсткості при наявності у матриці прямокутних призматичних порожнин формоутворення крайових зон елементу жорсткості відбувається самодовільним чином.



а – пряма схема; б – зворотна схема

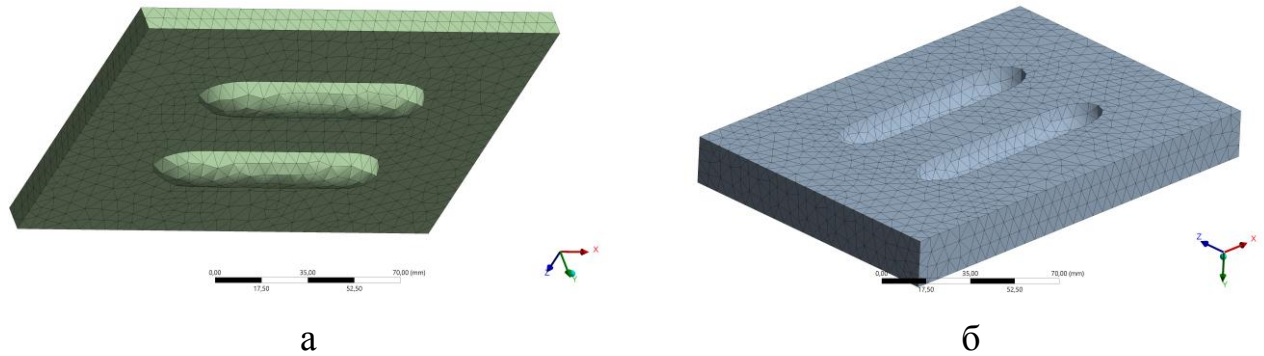
Рисунок 4.11 – Ізолінії елементу жорсткості після закінчення формоутворення та контури формоутворюючих поверхонь штампового оснащення

Задля забезпечення отримання потрібної форми крайових ділянок утворюваного елементу жорсткості форму робочих поверхонь штампового оснащення слід змінити. Для уникнення самодовільного формоутворення крайових ділянок робочі порожнини матриці слід замінити на гравюри, форма і розміри яких є відповідними формі та розмірам ребер пуансону, та є еквідистантними цим ребрам з урахуванням товщини заготовки.

Наведений далі спосіб формоутворення із застосуванням матриці з новими робочими поверхнями виконується за схемами, аналогічними попереднім прямій та зворотній схемі формоутворення.

Параметри штампування: зусилля штампування – 10000 Н (вектор С); швидкість зміщення пуансона – 1000 мм /с (вектор В).

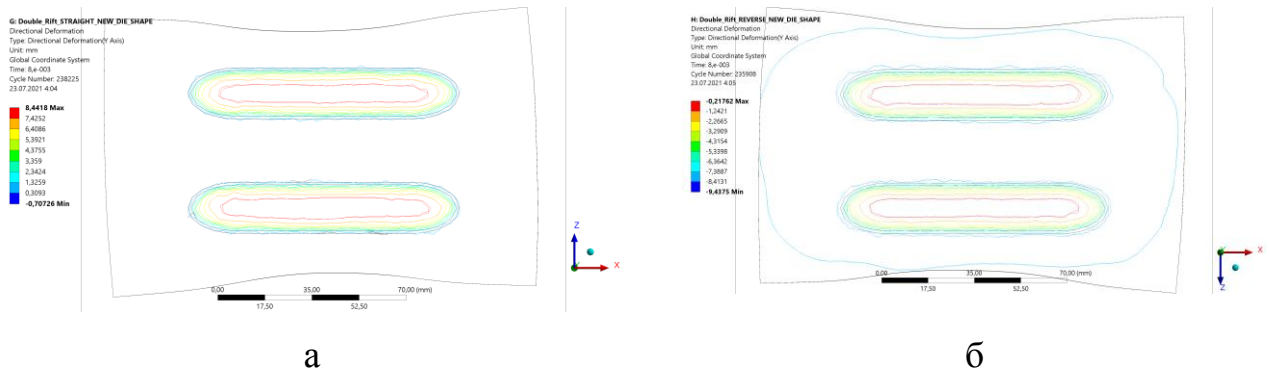
Параметри розрахункової сітки: кількість вузлів – 9365; кількість комірок – 32590.



а – пуансон; б – матриця

Рисунок 4.12 – Сіткове розбиття

Параметри сітки заготовки: метод розбиття – тетраедричний, відповідність геометричної форми.

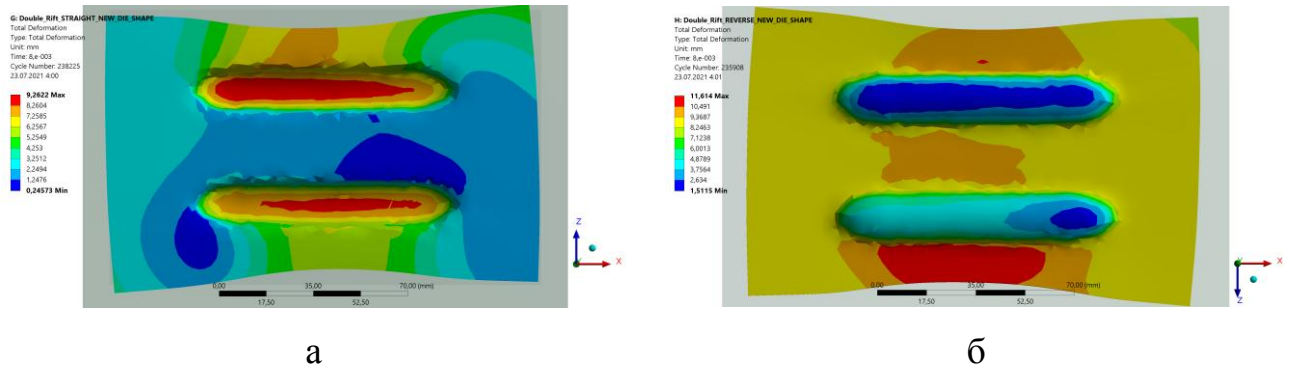


а – пряма схема; б – зворотна схема

Рисунок 4.13 – Ізолінії елементу жорсткості після закінчення формоутворення із застосуванням матриці з новими робочими поверхнями та контури формоутворюючих поверхонь штампового оснащення

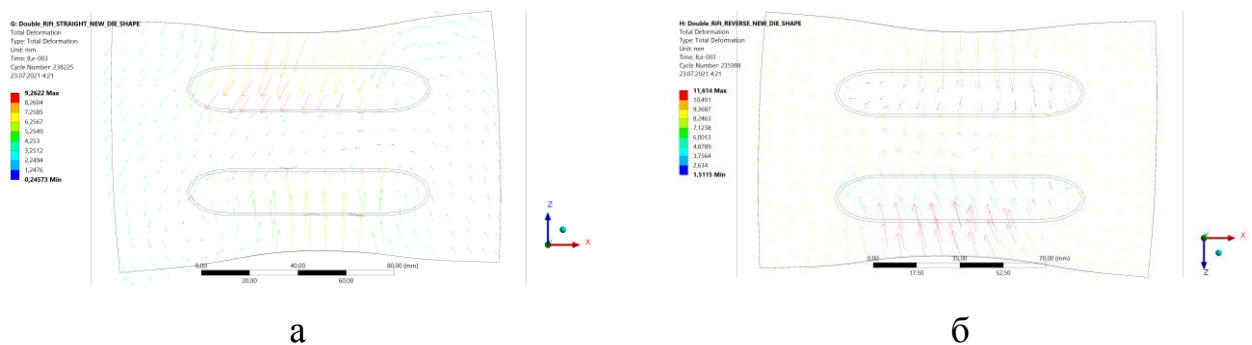
З наведених рисунків видно, що ізолінії деформованих ділянок утвореного елементу жорсткості збігаються із контурами формоутворюючих поверхонь штампового оснащення у випадку формоутворення як за прямою, так і за зворотною схемами. У обох випадках профіль форми утвореного елементу

жорсткості можна вважати таким, що відповідає потрібним результатам формоутворення.



а – пряма схема; б – зворотна схема

Рисунок 4.14 – Епюра загальних деформацій при формоутворенні із застосуванням матриці з новими робочими поверхнями



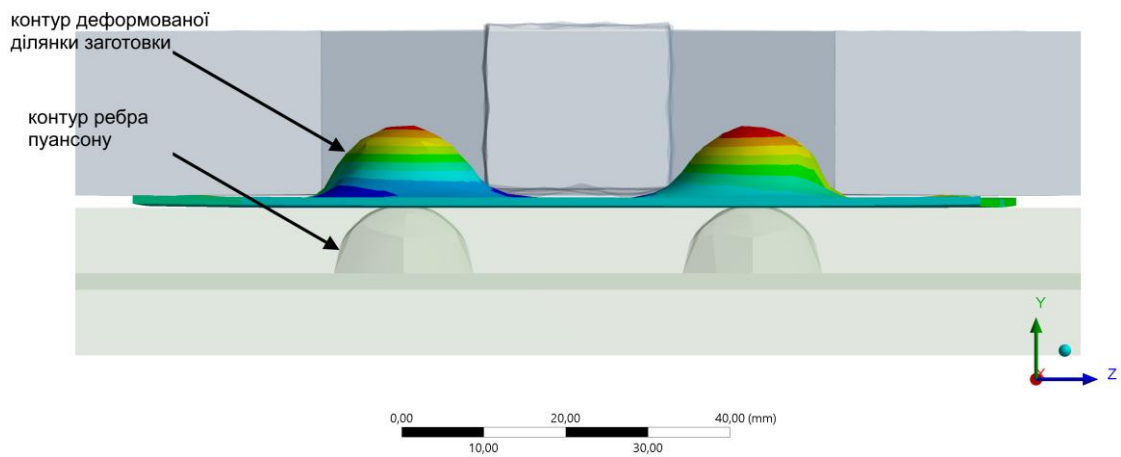
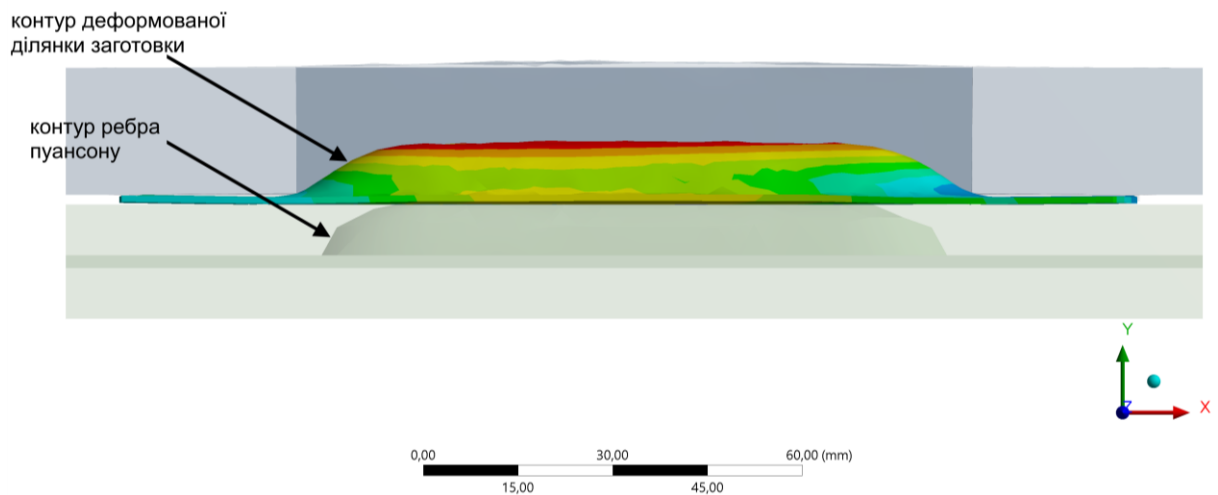
а – пряма схема; б – зворотна схема

Рисунок 4.15 – Епюра напрямків течії матеріалу при формоутворенні із застосуванням матриці з новими робочими поверхнями

З наведених рисунків видно, що у випадку формоутворення за прямою та зворотною схемами пластична деформація охоплює майже увесь об'єм матеріалу заготовки.

У випадку формоутворення за прямою схемою напрям течії матеріалу має характер розташованих протилежно по діагоналі вихідної заготовки завихрень, що спрямовуються у зони найбільших деформацій – ділянки формоутворення елементів жорсткості. Слід зазначити, що реактивний обертальний момент, що діє на заготовку у цьому випадку, прагне обернути її у горизонтальній площині

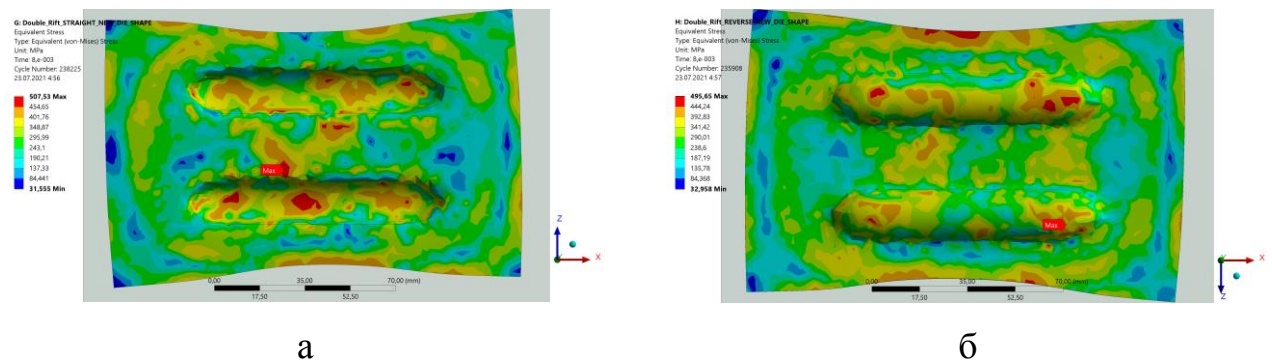
у напрямку вихрової течії матеріалу меншої інтенсивності (у даному випадку – проти руху годинникової стрілки), у зв'язку з чим спостерігається значне зміщення заготовки відносно її початкового розташування у штамповому оснащенні. У такому випадку при вільному штампуванні конструкція штампового оснащення має передбачати наявність додаткових упорів або притисків, що мають запобігати значним зміщенням заготовки у процесі формоутворення.



а – вид спереду; б – вид зліва

Рисунок 4.16 – Порівняння отриманої форми утворюваного елемента жорсткості та формоутворюючих ребер пуансону при зворотній схемі штампування

У випадку формоутворення за зворотною схемою течія матеріалу має більш усталений і симетричний характер. Основними ділянками, з яких спрямовується течія матеріалу, є ділянки середньої зони заготовки, розташовані паралельно утворюваним елементам жорсткості. У цьому випадку спостерігається більше відхилення кінцевого контуру заготовки від початкового (заготовка прагне набути форми «піщаного годинника» або «метелика») порівняно із формоутворенням за прямою схемою, що потрібно враховувати при розрахунку параметрів початкової заготовки при вільному штампуванні. Проте, при цьому заготовка майже не зміщується у горизонтальній площині.



а – пряма схема; б – зворотна схема

Рисунок 4.17 – Епюра еквівалентних напружень (за фон Мізесом) при формоутворенні із застосуванням матриці з новими робочими поверхнями

З наведених епюр розподілення еквівалентних напружень видно, що у випадку формоутворення за прямою схемою спостерігається локалізація напружень посередині ділянки заготовки, розташованої між утворюваними елементами жорсткості, що зумовлено характером течії матеріалу при такому способі формоутворення. Ділянками, що зазнають найменших напружень, є периферійні зони заготовки. У той же час ділянками з найбільшими напруженнями (червоний маркер – 507,53 МПа) є зона переходу плоскої частини відформованої заготовки у елемент жорсткості. Такий характер розподілення напружень несе ризики, пов'язані зі зворотним пружинінням відформованої заготовки та подальшою втратою потрібної форми а також виникнення локальних руйнувань у зоні переходу плоскої поверхні у елемент жорсткості.

У випадку формоутворення за зворотною схемою характер розподілення напружень має більш рівномірний та розподілений характер. Розташування ділянок заготовки з найбільшими напруженнями утворює симетричну пляму, розташовану навколо утворених елементів жорсткості. Напруження у ділянці заготовки, розташованій між утвореними елементами жорсткості, розподілені рівномірно та симетрично. Ділянка заготовки з найбільшими напруженнями (червоний маркер – 495,65 МПа) розташована на твірній елементу жорсткості, що відповідає характеру деформації.

З наведених діаграм видно, що формоутворення із застосуванням матриці з новими робочими поверхнями, форма та розміри яких є еквідистантними формоутворюючим ребрам пуансону, забезпечує отримання у крайових зонах утворюваного елементу жорсткості поверхні четвертого порядку однаковою мірою у випадку прямої та зворотної схем формоутворення. У випадку формоутворення за прямою схемою спостерігається нерівномірний вихроподібний характер течії матеріалу, який зумовлює значне зміщення заготовки при формоутворенні, що може викликати потребу у застосуванні штампового оснащення більш складної конструкції, а також нерівномірність розподілення залишкових напружень і їх локалізацію у ділянках між елементами жорсткості та зонах переходу пласкої поверхні відформованої заготовки у елемент жорсткості. У випадку формоутворення за зворотною схемою характер течії матеріалу та розподілення напружень має більш рівномірний та симетричний характер, а заготовка при формоутворенні зазнає менших зміщень у горизонтальній площині порівняно із формоутворенням за прямою схемою. Максимальні напруження, що виникають при формоутворенні за зворотною схемою, є нижчими порівняно із формоутворенням за прямою схемою.

Зіставлення результатів моделювання показало практично повний збіг експериментальних і розрахункових даних з точністю до знака після коми. Формування дозволяє знизити напруження в зоні сполучення рифту на 18 %, а інтенсивність деформацій – на 2–3 %. Це дозволяє усунути руйнування на цій

ділянці заготовки, при цьому форма поверхні закінцівки рифту поза контактом з інструментом майже збігається з поверхнею, отриманою унаслідок формування жорстким інструментом. Унаслідок обтягування по пуансону рівень інтенсивності напружень у вершині рифту знижується на 20–24 %. Зона можливого руйнування знижується на ділянку радіуса сполучення плоскої ділянки з циліндричним. При цьому зменшується величина стискальних напружень на 15–20 % і виключається утворення гофр на плоских ділянках заготовки.

У разі простої постановки, ураховуючи, що два сусідні елементи визначають зміну деформованого стану, можливе використання апроксимувальних поліномів n -го ступеня.

Протяжність ділянки, на якій розташовані деформовані елементи, беремо рівним B – половині відстані між рифтами. Вимірювані деформації визначають виразами:

$$\varepsilon_{11} = \ln \frac{\Delta x^0}{\Delta x_{11}}; \quad \varepsilon_{22} = \ln \frac{\Delta x^0}{\Delta x_{22}}; \quad \varepsilon_{12} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (4.2)$$

де Δx^0 – розміри елемента координатної сітки в напрямку осі x_{11} та x_{22} до деформації; Δx_{11} , Δx_{22} – розміри елементів координатної сітки в напрямку x_{11} та x_{22} на даному етапі деформації; α – кут викривлення спочатку прямого кута елемента.

Визначивши для кожного етапу деформації, отримуємо залежності:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \varphi_{11}(B); \\ \varepsilon_{22} &= \varphi_{22}(B); \\ \varepsilon_{12} &= \varphi_{12}(B). \end{aligned} \quad (4.3)$$

Узявши похідні постійних залежностей, отримуємо залежність поетапних деформацій залежно від B .

Для восьмого стовпця розподіл деформацій для $\varepsilon_{11} \approx 0$, для $\varepsilon_{12} \approx 0$; графік залежності $\varepsilon_{22} = \varphi_{22}(B)$ зображено на рис. 4.18. Його апроксимація за методом найменших квадратів квадратним тричленної призводить до вираження:

$$\varepsilon_{22} = -0,0033x_u^2 + 0,049x_{11} - 0,1742. \quad (4.4)$$

Апроксимація логарифмічною функцією має вигляд:

$$\varepsilon_{22} = 0,0736 \ln(x_{11}) - 0,1332. \quad (4.5)$$

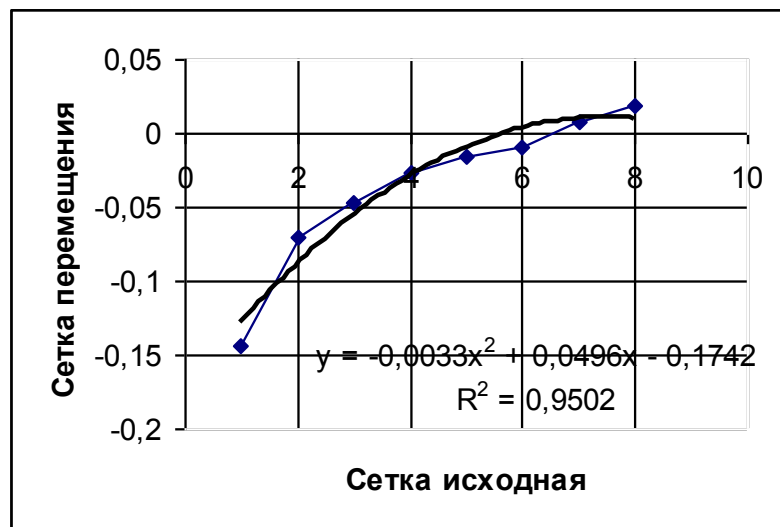


Рисунок 4.18 – Розподіл поетапних деформацій для точок восьмого стовпця

У першому випадку середньоквадратична помилка (вибіркове середньоквадратичне відхилення) становить $R^2 = 0,9502$. У другому випадку маємо більш точну апроксимацію – $R^2 = 0,9804$.

Отримані дані використовуємо для формування інтерполювальних функцій у методі скінченних елементів.

4.4 Експлуатаційні випробування листових матеріалів

Випробування на зносостійкість виконувались на зразках зі Ст. 3 з різним ступенем деформації, що були змонтовані на зубі ковша екскаватора. Випробування проводили на піщаному кар'єрі. Ступінь деформації зразків дорівнювала граничній рівномірній ε_p , межі руйнування ε_e , недеформований ε_o та $0,5\varepsilon_p$, а також зразки, що були деформовані в умовах інтенсивної пластичної деформації. За інтенсивності деформації $\varepsilon_I = \varepsilon_p; \lambda \approx 1,28\delta$; при $\varepsilon_i = \varepsilon_e; \lambda \approx 1,8\delta$; при $\varepsilon_i \approx \varepsilon_o; \lambda \approx 1,15\delta$; при $\varepsilon_i = 0,5\varepsilon_p; \lambda \approx 1,2\delta$; при деформації в умовах інтенсивної пластичної деформації $\lambda \sim 1\delta$.

Пластини товщиною 3 мм установлювали на центральний зуб екскаватора. За кермом екскаватора була одна й та ж людина. Випробування проводили під час однієї зміни (8 годин).

Лінійне зношування у порядку зростання розташовується наступним чином: при ε_p (2,0 мм); $0,5\varepsilon_p$ (2,2 мм); ε_e (2,56 мм); ε_o (2,8 мм). Товщина вимірювалась у найбільш зношеній ділянці листової заготовки.

Корозійні випробування проводили у науково-дослідному центрі «Електросталь» (м. Харків, Україна).

Випробування на корозійну стійкість проводились в умовах у камері соляного туману (розпилений 5 % розчин $NaCl$). Термін випробування – 120 годин. Результати випробувань наведені в табл. 4.4. Оцінювання результатів проводили за ступенем корозійного ураження [26, 119].

Таблиця 4.4 – Результати випробувань корозійної стійкості зразків при різних ступенів деформації

Ступінь деформації зразка	Ступінь ураження корозією			
	3 години	6 години	9 години	120 години
ε_o	15	45-50	85-90	100
ε_p	20	55	90	100
$0,5\varepsilon_p$	40-45	60-70	90	100
ε_e	45-50	80	90	100

Результати випробувань подані на рис. 4.19.



Рисунок 4.19 – Зразки деформованих пластин після випробування на корозійну стійкість

Аналіз результатів експериментальних випробувань на корозійну стійкість підтверджує, що найбільш ураженими корозією є елементи деталей з найбільшою деформацією.

Аналогічні за швидкістю випробування проводили за умови періодичної конденсації вологості [26, 119], а також проведені випробування деформованих зразків з елементами жорсткості. Визначено негативний вплив деформації металу на його корозійну стійкість. Довговічність деталей в умовах корозійного впливу оцінюється за методикою аналогічною методиці випробуванням на втомну міцність за залежністю:

$$Z_k = Z_k^0 [1 - (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})], \quad (4.6)$$

де Z_k, Z_k^0 – довговічність деформованої та недеформованої деталі.

Висновки до розділу 4

1. У результаті проведених у роботі експериментальних досліджень доведена можливість отримання придатних виробів методом розгинання полиць з формуванням елемента жорсткості.

2. Підтверджено факт зменшення зусиль під час отримання деталей холодною деформацією заготовок з накладенням коливань. У разі розгинання полиць зниження потрібного зусилля досягало $1,19 \div 1,6$ рази.

3. Результати дослідних даних за виміром переміщень у вертикальній площині показали, що прогин і радіус кривизни згинальної смуги залежить не

тільки від геометрії заготовки, матеріалу, її товщини, але також і від величини попереднього вигинання полиць. Чим більший кут попереднього вигинання, тим більшого переміщення набуває пластина у вертикальному напрямку.

4. Осцилограми підтверджують факт зменшення зусиль у разі вільного формування елемента жорсткості, порівняно з вільним вигинанням і формуванням.

5. У результаті обробки експериментальних даних методами математичної статистики (ГОСТ 8.207-86) підтверджується нормальність розподілу результатів експерименту, відтворюваність експериментів підтверджується критерієм Кохрена за рівня значущості $q = 0,05$. Адекватність математичної моделі експериментальним даним підтверджується критерієм Фішера за довірчої ймовірності 0,95, межа помилок, розрахована за дисперсією адекватності, становить $\pm 9 \%$, рівень значущості – 0,05.

6. Розроблено метод розрахунку геометричних і силових параметрів процесу формозмінювання довгомірних деталей з елементом жорсткості завдяки послідовному згинанню полиць та вільно встановленої торцями заготовки з вигнутими полками, що дозволяє на заключній стадії формозмінювання виключити пластичну деформацію елемента сполучення та полиць й утрату стійкості останніх.

РОЗДІЛ 5

УПРОВАДЖЕННЯ У ВИРОБНИЦТВО, ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

5.1 Метод розрахунку технологічних параметрів отримання деталей з елементом жорсткості послідовним згинанням

В умовах ремонту одиничного та дрібносерійного виробництва одним з ефективних методів формозмінювання довгомірних деталей з елементами жорсткості є послідовне штампування. Деталі з одним елементом жорсткості та деяких деталей одинарної та подвійної кривизни можуть бути виготовлені методами послідовного згинання вільно встановлених торцями пластин і плит без застосування штампів [120].

У роботі авторів [120] описаний спосіб послідовного згинання деталей з елементом жорсткості. Цей метод дозволив значно зменшити деформувальні зусилля (у 2–6 рази) і набув застосування для виготовлення деталей вагонних конструкцій. У запропонованому способі під час розгинання полиць деформація центральної ділянки відбувається без впливу контактних напружень. Кривизна формоутворювального елемента жорсткості не визначається робочими поверхнями інструменту, а виникає в результаті дії реактивного моменту. Поява моменту пов'язана з утворенням пар сил, прикладених до торця відігнутих полиць і реакціями доданими до елемента заготовки вільно встановлених пласкою поверхнею на поверхню постелі преса. З зміною кривизни елемента жорсткості відбувається горизонтальне переміщення площини контакту в горизонтальному напрямку. При цьому виникають сили тертя, що перешкоджають формозмінюванню елемента жорсткості. На величину кінцевого прогину при заданій ширині полиць впливають: зусилля, що необхідне для відгинання полиць Q , величина радіуса сполучення елемента жорсткості з полицею r , кут нахилу полиць β , показники зміцнення матеріалу заготовки. Для подальшого використання запропонованого способу формозмінювання необхідно його вдосконалити завдяки спрощенню

технологічного оснащення та стабільності одержуваної геометрії. Окрім того, необхідно розробити методику розрахунку технологічних параметрів процесу.

Визначимо розміри заготовки, в даному процесі згинання. Розрахунок заготовки здійснюємо за геометричними параметрами серединної поверхні деталі. Заданими розмірами (рис. 5.1) є ширина полки – a ; радіус сполучення полки з елементом жорсткості – r , ширина елемента жорсткості (проліт) – $2b$; величина зміщення лінії контакту заготовки з опорною поверхнею – h ; стріла прогину елемента жорсткості зазвичай становить половину довжини прольоту, тобто $b/2$. Зміною товщини заготовки в умовах вільного або циліндричного згинання можна знехтувати.

Необхідно визначити величину зміщення h і радіус дуги елемента жорсткості R . Використовуємо поняття «ступінь точки відносно даного кола».

Ступінь точки F (рис. 5.1) дорівнюватиме $p^2 = b^2 = b \cdot \left(R - \frac{b}{2}\right)$, або в загальному випадку:

$$p^2 = b^2 = k \frac{b}{2} \cdot \left(R - k \frac{b}{2}\right), \quad (5.1)$$

де k – часткова частина стріли прогину елемента жорсткості щодо довжини прольоту; R – радіус кривизни елемента жорсткості.

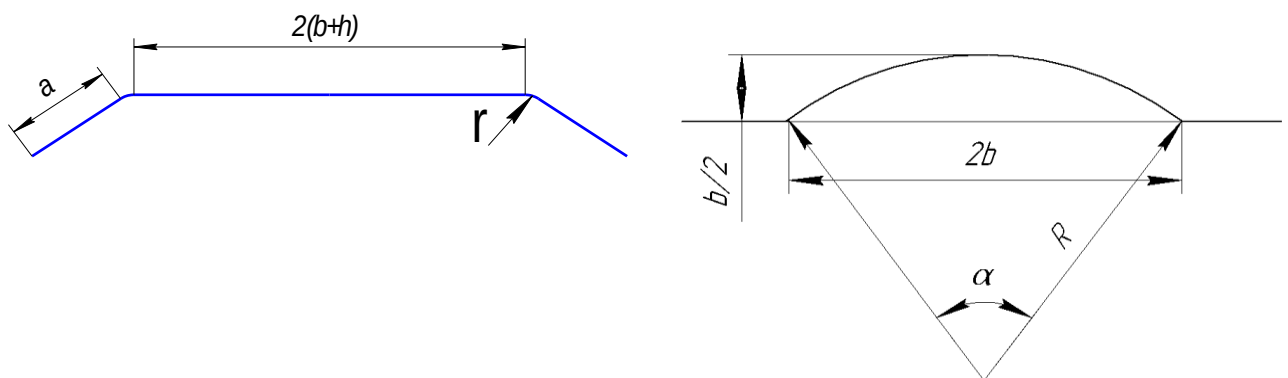


Рисунок 5.1 – Схема заготовки в процесі згинання

Початкова довжина елемента заготовки з якого формується елемент жорсткості, дорівнює $2(b + h)$.

З урахуванням (5.1) $R = 2,5b$ і враховуючи, що центральний кут вигину $\alpha = \frac{180^\circ \cdot 2(b+h)}{\pi R}$, а $\sin \alpha = \frac{b}{R} = 0,4$, отримуємо $h = 0,48b$.

Отже, розмір заготовки складе:

$$L_{заг} = 2a + \pi R + 2,96b. \quad (5.2)$$

Для визначення кута відгинання полиць необхідно визначити силові параметри процесу формування елемента жорсткості. При цьому слід урахувати, що унаслідок розгинання полки не повинні втратити стійкості та деформуватися пружно. В елементі сполучення полки з елементом жорсткості також не повинні виникати пластичні деформації, тому що це призведе до енергетичних утрат у процесі деформозмінювання.

Максимальні напруження в полках для умов чистого (циліндричного) вигину визначають за залежністю [118]:

$$\sigma = \pm \frac{\sigma_{Qa}}{\sigma^2} \leq \sigma_{m}, \quad (5.3)$$

де σ_m – межа пропорційності.

У цьому виразі напруження σ лінійно змінюються по товщині заготовки та максимальні на нижній та верхній поверхнях полиць.

Напруження в матеріалі заготовки, що має початкову кривизну (рис. 5.1) ділянка сполучення полки з елементом жорсткості, визначають з рівняння рівноваги в радіальному напрямку [118]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\phi - \sigma_r}{r} \quad (5.4)$$

де σ_r – радіальне напруження; σ_ϕ – тангенціальне напруження.

Уводячи функцію Ері ϕ , отримуємо:

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{d\phi}{dr} \quad \text{та} \quad \sigma_\phi = \frac{d^2\phi}{dr^2} \quad (5.5)$$

Значення функції Ері ϕ визначають за рівнем нерозривності [121, 122]. З використанням умови пластичності Тріска-Сен-Венана в роботі [118] отримано

значення згинального моменту на одиницю довжини, який в нашому випадку буде граничним:

$$M_1 = \frac{\sigma_s \left[(r + \delta)^2 - r^2 \right]^2 - 4(r + \delta)^2 r^2 \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{\delta}{r} \right) \right]^2}{2 \left[r^2 - (r + \delta)^2 \right] + 2r^2 \ln \left(1 + \frac{\delta}{r} \right)} \quad (5.6)$$

Значення цього моменту не повинно перевищувати моменту необхідного для формування елемента жорсткості. Останній визначають із залежностей, запропонованих у роботі [118]. Робота, що здійснюється під час розгинання полки одиничної ширини перетворюється на роботу пружного розгинання елемента сполучення полиць з елементом жорсткості та роботу пружно-пластичного деформування елемента жорсткості. Для тонких заготовок ступеневу залежність $\sigma = A \cdot \varepsilon^n$ можна розглядати по всій висоті (тобто і на пружну область), тоді формула для визначення роботи матиме вигляд:

$$A_2 = \left[\frac{M}{1+n} - \frac{(1-n)E\varepsilon_p^2}{2(1+n)\chi_0} \right] \varphi, \quad (5.7)$$

де M – момент внутрішніх сил; χ_0 – кривизна нейтрального шару; n – показник зміцнення; φ – центральний кут.

Тут

$$M = \chi_0 EI_{ypr} + \chi_0^n \kappa_{II} I_{nl}; \quad (5.8)$$

$$I_{ypr} = \frac{2}{3} b y_p^3; \quad I_{nl} = \frac{2b}{n+2} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^{n+2} - y_p^{n+2} \right];$$

де b – ширина перетину; y_p – висота пружно деформованої зони; h – висота перетину.

Потім визначимо граничне поздовжнє навантаження на полиці. Граничне поздовжнє навантаження полки, яке призводить до втрати стійкості, залежить від кута згинання полки та становить:

$$P_{\kappa p} \sin \varphi = \frac{F \delta^3 \pi^2 E}{B^2}, \quad (5.9)$$

де E – модуль пружності сталі; F – площа поперечного перерізу полиці; δ – товщина заготовки.

Зусилля, необхідне для вигину полиць, відповідає умовам вільного згинання та визначається досить просто з умови рівності моментів внутрішніх і зовнішніх їх сил.

У нашому випадку ставиться завдання максимального зниження деформувальних зусиль і немає сенсу відгинання полиць на кут 90° за якого тиск згинання повинен бути нескінченно великим.

За апроксимації діаграми $\sigma_i - \varepsilon_i$ ступеневої залежностей тиск згинання визначається з виразу:

$$q = \frac{4R^2 B \left(\frac{S_0}{2R} \right)^{d+2}}{(\alpha + 2)(A - R\varphi)^2}, \quad (5.10)$$

де q – тиск згинання; S_0 – товщина заготовки; R – радіус нейтральної вісі вигину; A – довжина полки, що відгинається з урахуванням радіуса сполучення; φ – кут згинання;

$$a = A - R\varphi.$$

Наведені дані дозволяють установити послідовність розрахунку силових і геометричних параметрів процесу.

Розрахунок параметрів процесу проводять у такій послідовності. За кресленням деталі визначаємо розміри заготовки за залежністю (5.1). Після цього визначаємо значення згинального моменту необхідного для оформлення елемента жорсткості (5.9). За відомою шириною полиці та радіуса з'єднання полки з елементом жорсткості визначаємо зусилля преса $Q = \frac{M}{r + a}$. Потім визначаємо максимальні напруження в полиці та граничний момент на ділянці сполучення полки з елементом жорсткості. Напруження в полках не повинні перевищувати межі пропорційності матеріалу заготовки. В іншому випадку

виникають енергетичні втрати на пластичну деформацію попередньо відштампованих заготовок. Якщо це відбувається, необхідно за погодженням з конструкторами зменшувати радіус сполучення та повторити розрахунок, починаючи з визначення розмірів заготовки. Після цього визначаємо зусилля, яке необхідне для згинання полиць. За запропонованою методикою був проведений розрахунок процесу формозмінювання деталі вантажного вагона з елементом жорсткості «Лист верхній шкворневої балки». Деталь виготовлена з матеріалу 09Г2С, товщина листа – 8 мм, довжина заготовки 3000 мм. Геометрія заготовки відповідала формі отриманої деталі. Розрахункове зусилля деформування склало 10,16 МН. При цьому зусилля втрати стійкості полиць відбувалася при $\beta = 76^\circ$. Для штампування деталей був використаний кромко згинальний стан зусиллям 12 МН.

5.2 Технологічне оснащення для реалізації запропонованих методів штампування

Листові деталі (облицювальні та кузовні) надають форму транспортному засобу, захищають пасажирів, обладнання, агрегати від впливу середовища у силовому відношенні об'єднують у єдине ціле всі елементи (частини) транспортного засобу. В залежності від експлуатаційних функцій призначаємо технологічні дії, що пов'язані з силовою та тепловою інтенсифікацією формозмінювальних, функціонально-орієнтованих операцій листового штампування.

У результаті проведених у роботі досліджень встановлено, що найбільш доцільно використовувати запропонований метод формозмінювання, що полягає в послідовному згинанні. Удосконалено універсальний комплект інструментів для згинання (рис. 5.2, 5.3), який складається з універсальної матриці 1, пуансона 2, планок 3 і 4, універсальної матриці 1, пуансона для згинання 2, пуансона 3, заготовки 4.

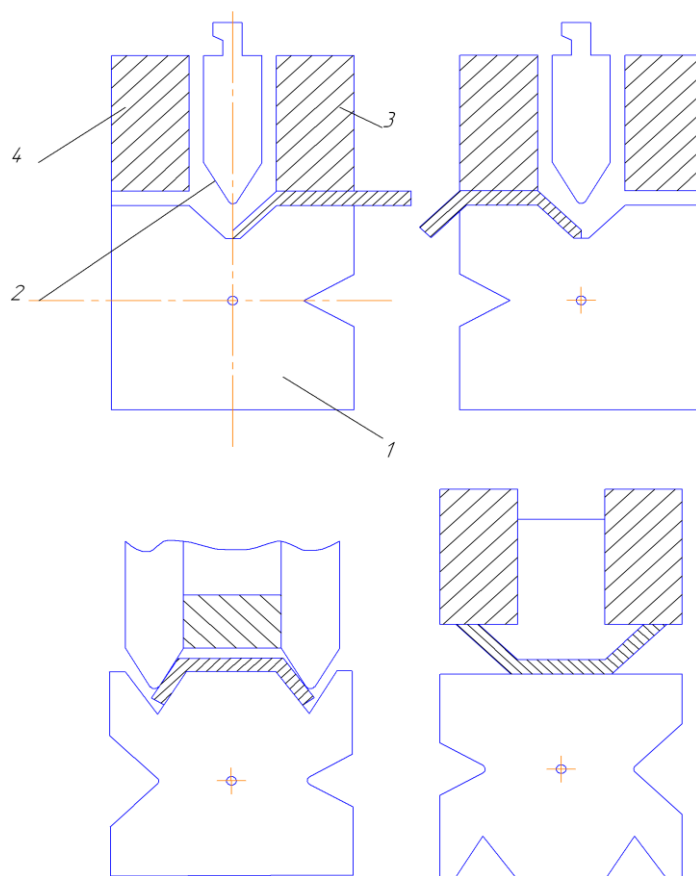


Рисунок 5.2 – Універсальний комплект інструментів для згинання
(наявна технологія)

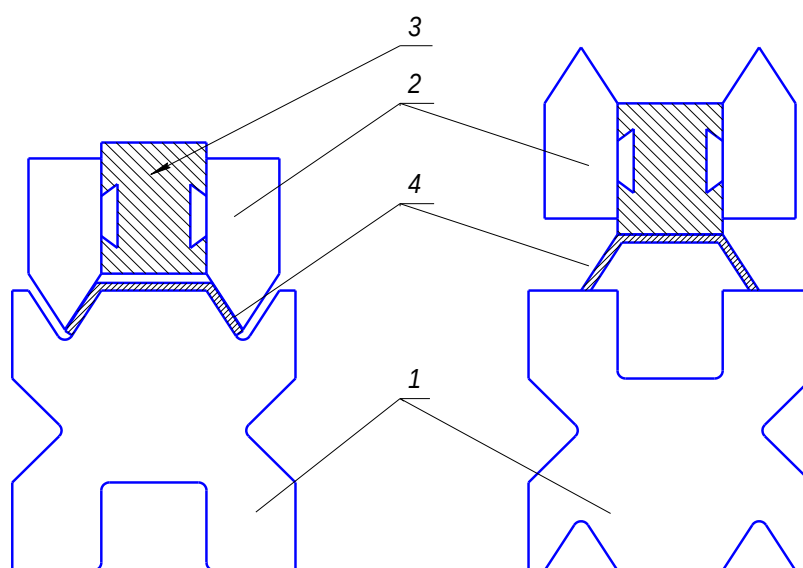


Рисунок 5.3 – Універсальний комплект інструментів для згинання
(за новою технологією)

Для більш якісного виготовлення деталей «Накладка» була також удосконалена схема штампування обтягуванням ступеневим пуансоном. При цьому радіус перетяжного ребра було збільшено на 25 %. Це надало можливість зменшити зусилля деформування на 45–50 %. Цю технологію використовували на підприємстві, якщо наявних потужностей було недостатньо для розв’язання промислових завдань.

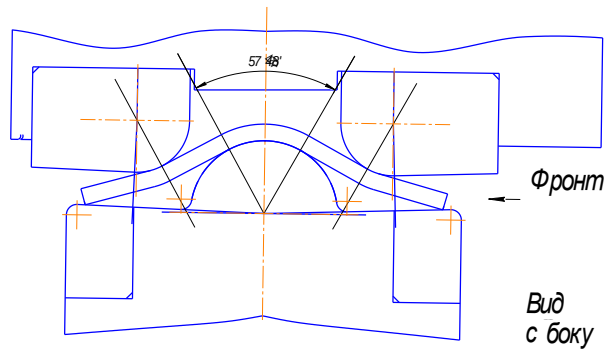


Рисунок 5.4 – Удосконалена конструкція технологічного оснащення для виготовлення деталі «Накладка»

5.3 Результати впровадження у виробництво

Теоретичні та експериментальні дослідження дозволили розробити технологічний процес, спроектувати та виготовити штамп, а також вибрати прес для виготовлення дослідної, а потім і промислової партії деталей «Кришка люка» в умовах ПрАТ «АвтоКрАЗ». Удосконалено технологію формування деталей з прямолінійними елементами жорсткості в умовах виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» та ПрАТ «АвтоКрАЗ». Перелік цих деталей містить «Накладка» різних виконань і «Кришка люка» з 3–6 прямолінійними елементами жорсткості з матеріалів 09Г2С, 09Г2Д, Ст. 3, 10ХНДП, Ст. 3пс. Вихідна товщина листа – 5 мм, форма закінцівки рифту (прямолинійного елемента жорсткості) прямолинійна, веретеноподібна та закруглена.

Деталі «Кришка люка» та «Накладка» застосовують у конструкціях вагонів для перевезення сипучих матеріалів (рис. 5.5).



Рисунок 5.5 – Готова деталь

Для її виробництва спроектований штамп для послідовного формування рифт, а саме – по два рифти за хід преса. Фото штампа подано на рис. 5.6.

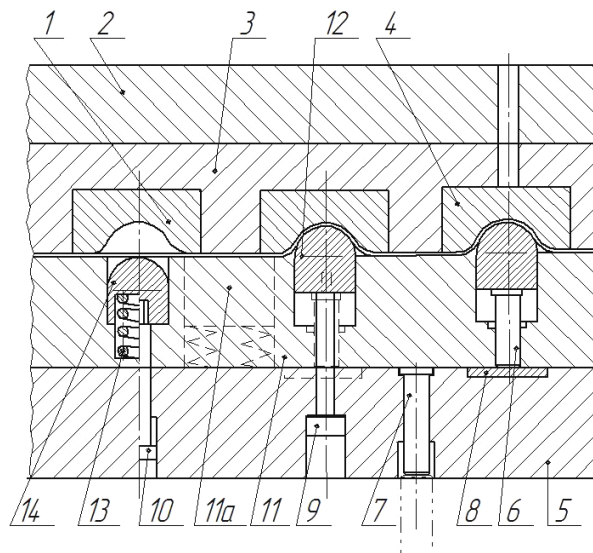


Рисунок 5.6 – Фото штампа

Креслення елемента конструкції штампа подано на рис. 5.7.

У цій конструкції штампа реалізована технологічна схема обтягування по пуансону (реверсивного формування) [53]. Її переваги описані раніше.

Робота штампа полягає в тому, що лист подається в штамп і відбувається формування двох рифт за втопленого підпружиненого пуансона 14. З наступним ходом повзуна преса відбувається подавання листа до положення, коли другий відформований рифт облягає підпружинений пуансон. Потім відбувається формування двох наступних рифт з centruванням заготовки підпружиненим пуансоном. Наступний перехід аналогічний другому.



1, 4, 15 – секція матриці; 2 – плита верхня; 3 – державка; 5 – плита нижня;
 6, 7 – штовхач; 8 – підкладка; 9, 10 – гвинт спеціальний; 11 – притиск;
 12 – пуансон; 13 – пружина; 14 – фіксатор

Рисунок 5.7 – Креслення елемента конструкції штамп

Штамп проєктувався під обладнання, яке експлуатується на ПрАТ «АвтоКрАЗ». Можливо штампування на гідравлічному пресі зусиллям 1000 т (10 000 кН), або на двостійковому двокривошипному пресі РКZZ I 1250/4000 номінальним зусиллям 1250 т (12 500 кН) з кількістю ходів 11 хід/хв (5,45 с – один хід), зусилля подушки під час листопритискання 250 т. Однак гідропрес зусиллям 1000 т не забезпечував необхідну продуктивність. Тому був вибраний прес РКZZ I. Причому розроблений технологічний процес послідовного формування перевершив за продуктивністю не тільки гідропрес зусиллям 1000 т, а й прес зусиллям 5000 т на 10–12 %. На цьому пресі з нагріванням і в холодному стані можна відштампувати деталь за один перехід. Фото преса РКZZ I подано на рис. 5.8.

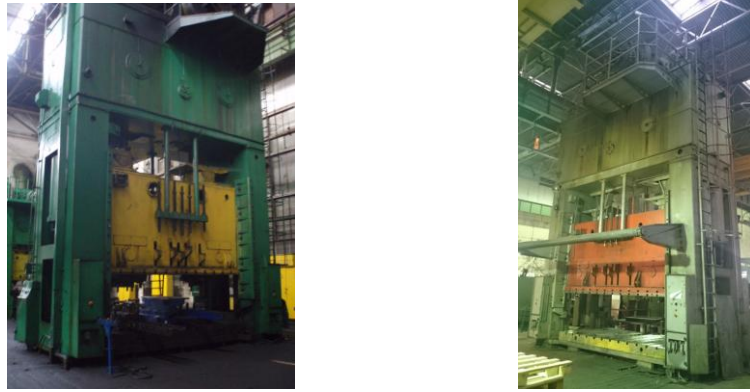


Рисунок 5.8 – Прес PKZZ I 1250

У цілому рекомендації з формування листових автомобільних деталей з елементами жорсткості використані для складного витягування деталей одинарної та подвійної кривизни подані на рис. 5.9 [53].



Рисунок 5.9 – Листові автомобільні деталі з елементами жорсткості

Підвищення якості деталей забезпечується завдяки запобіганню утворенню гофрів з використанням закінцівки прямолінійного ребра з рівним ступенем деформації. Окрім того, між закінцівками ребра жорсткості штампувалися впадини (рис. 5.10). Це запобігало виникненню гофрів у цих зонах і перетіканню матеріалів між ребрами.

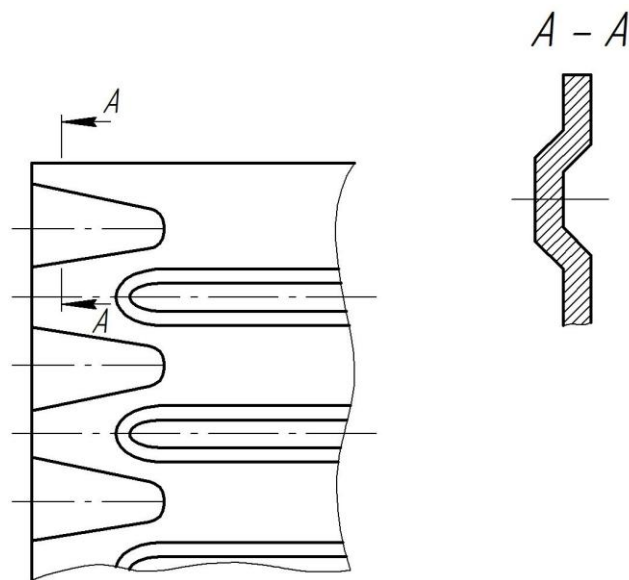


Рисунок 5.10 – Нова конструкція листової деталі «Кришка люка» з додатковими елементами жорсткості

5.4 Рекомендації щодо правки дисків коліс у процесі експлуатації

Жорсткість та якість ободів коліс суттєво впливають на безпеку руху та економічні показники роботи автомобіля, комфортабельність і стійкість під час руху. Вимоги міцності та жорсткості зазвичай протирічать вимогам технологічності (оброблюваності) та економічності ободів коліс. Сучасний стан доріг на Україні та близькому Зарубіжжі вкрай негативно впливає на умови експлуатації як автомобіля, так і обода колеса (рис. 5.11). Зокрема на обід колеса, окрім знакозмінних навантажень, діють й ударні. Останні призводять до локальних деформацій обода.

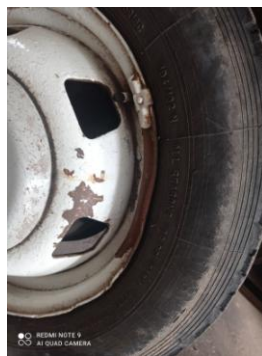


Рисунок 5.11 – Пошкоджені диски коліс

Ободи коліс, які виготовляють на Кременчуцькому колісному заводі, виконують з листового прокату методом радіально-ротаційного профілювання із застосуванням операцій холодного штампування (попереднє осаджування, розтиснення, обтиснення). Залежно від складності профілю, обід профілюють за 3, 4 і 5 переходів. У процесі першої операції здійснюється профілізація бортових закраїн. Друга операція формує чорновий профіль, тобто профіль, у якому наявні всі його конструкційні елементи (борт, посадочні полки, центральний рівчак). На третьому етапі проводять загинання бічних закраїн, остаточну обробку посадкових полиць і доведення всіх радіусів.

Після профілювання [96] обода на ділянці переходу від бортової закраїни до посадкової полиці відносні деформації складають: стоншення – 15...17 %, подовження 2–3 %, поперечна деформація – 25...30 %. Під час переходу від посадкової полиці до струмка деформації знаходяться в межах 3...4 %; 5...6 % і 10...12 % відповідно. У місцях радіусних переходів центрального струмка – 18...20 %; 12...14 %; 38...40 % у такому самому порядку. Інтенсивність деформацій складе 21...23 %, 6...8 %, 25...28 % відповідно. Максимальне відносне подовження матеріалів, що використовують для виготовлення ободів коліс, лежить у межах 31...35 %.

Отже, технологічна спадковість обмежує ресурс пластичності обода колеса в межах 10...15 %. Максимальне стоншення в листах радіусних переходів від бічної стінки до середини центрального рівчака становить 0,6 мм (18 % товщини вихідного металу). Це вказує на відсутність резервів пластичності металу для подальшого пластичного формозмінювання.

Важливо також зауважити про безперспективність виготовлення дисків коліс методами лиття та об'ємного штампування. Їх експлуатація може призвести до так званого реологічного вибуху та спонтанного руйнування диска під час руху.

Технологія виготовлення обода, його експлуатація та правка після деформації пов'язані з реверсом напружень (ефект Баушингера) і, як наслідок, зниження межі текучості матеріалу. Критерієм оцінювання переходу матеріалу в

інший граничний стан (розрив металу обода) є поява на поверхні обода першої візуально виявленої тріщини під час правки (стиснення).

Чи призведе правка обода колеса до неприпустимого зниження міцності та жорсткості колеса? Вирішення цього питання можливе з використанням теорії граничного формозмінювання та деформованості [96]. Завдання формується так.

Надано деформуємий обід, що підлягає деформації, для якого визначені тензори напружень та деформацій T_σ, T_ε . Необхідно обчислити ступінь деформації зсуву λ , порівняти її з гранично допустимою λ_p і встановити ступінь використання ресурсу пластичності ψ для найбільш небезпечної точки деформованого обода:

$$\psi = \int_0^\lambda (1 + \alpha\Phi) \frac{\lambda^{\alpha\Phi} d\lambda}{\lambda_p^{1+\alpha\Phi}} < 1, \quad (5.10)$$

де Φ – функція зміни показника схеми напруженого стану, α – константа.

Інтегрування можна замінити підсумовуванням приростів інтенсивності деформацій зсуву $\Delta\lambda_{ij}$:

$$\psi = \sum \frac{\Delta\lambda_{ij}}{\lambda_p(P_\sigma)}, \quad (5.11)$$

де P_σ – показник жорсткості схеми напруженого стану $P = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_i$; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження; σ_i – інтенсивність напружень.

Розглянемо процес випрямлення вм'ятини на бортовій закраїні під дією рівномірнорозподіленого навантаження. Аналіз умов випрямлення («посадки») вм'ятини конічної поверхні полягає у розв'язання завдання пластичного деформування конічної або циліндричної дії внутрішнього рівномірно розподіленого навантаження q_c (рис. 5.12).

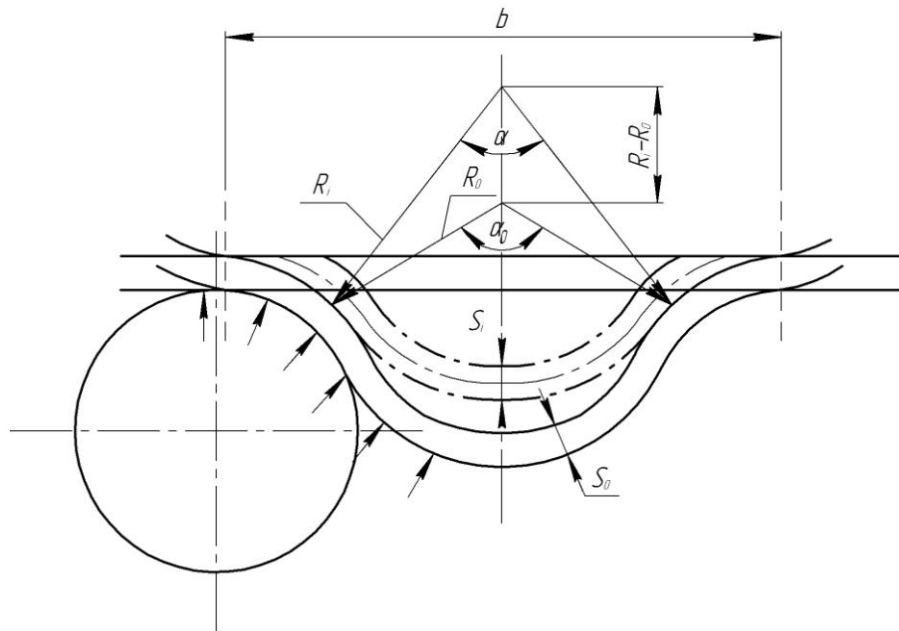


Рисунок 5.12 – Виправлення вм'ятини під дією розподіленого навантаження

За цих умов поточна деформація стиснення дорівнює

$$\varepsilon_1 = \alpha_i \cdot R_i \cdot \alpha_0^{-1} \cdot R_0 - 1. \quad (5.12)$$

Значення середньої товщини заготовки на ділянці деформації визначимо з умови сталості обсягу:

$$s_i = R_0 \cdot \alpha_0 \cdot S_0 \cdot b^{-1}. \quad (5.13)$$

Напруження стиску в будь-який момент деформації дорівнюють

$$\sigma_1 = \frac{q \cdot b^2}{R_0 \cdot S_0 \cdot \alpha_0}. \quad (5.14)$$

Значення $\alpha_p(\Pi_\sigma)$ можна обчислити за лінійною апроксимувальною функцією

$$\alpha_p(\Pi_\sigma) = \sigma_0 + B \left(\frac{b}{R_0 \cdot \alpha_0} - 1 \right). \quad (5.15)$$

Для сталі 10кп $\sigma_0 = 1,9$; $B = -1,1$.

Для обчислення $\Delta\alpha_{ij}$ використовуємо залежності

$$\alpha = \sqrt{3} \int_0^t \ell_i \cdot dt, \quad \Delta\lambda \approx d\lambda = \sqrt{3} \ell_i \cdot dt. \quad (5.16)$$

Ураховуючи, що

$$\ell_i = \frac{b}{\alpha_0 R_0} - 1,$$

$$R_i - R_0 = v_0 dt \quad (5.17)$$

де v_0 – швидкість руху інструменту, що править.

Умову деформованості без руйнування $\lambda < \lambda_p$ з урахуванням спільного рішення рівнянь (5.12) ... (5.17) отримуємо за відношенням висоти вм'ятини до товщини металу обода. Слід урахувати, що місце правки має знижену міцність та твердість і під час експлуатації деформація обода локалізується в місці правки. Тому після правки обода необхідна його термічна обробка: відпал + загартування + відпустка. Витрати на термічну обробку порівняні з вартістю нового диска. Виключити наслідки правки за умови деформації обода без руйнування можливо, використовуючи вібраційні методи обробки металів тиском.

Накопичена ступінь деформації, що характеризує зміну форми заготовки, дорівнює сумі одиничних ступенів деформації, що реалізуються на кожній з штампувальних операцій і не залежить від проміжної та кінцевої термообробки заготовки:

$$e_{l\Sigma}^i = \sum_{m=1}^{N_O} \sum_{i=1}^{N_{II}} \sum_{k=1}^{N_C} e_{klm}^j \quad (5.18)$$

де m, l, k – кількість операцій, переходів, стадій.

Беремо, що в межах окремої стадії процес наближений до монотонного.

Накопичена ефективна ступінь деформації характеризує деформаційне зміцнення металу. Для позначення цього поняття застосовують терміни «параметр зміцнення» і «параметр Удквіста». Можна також назвати цю величину ступенем наклепу [96].

У межах окремого технологічного штампувального переходу ефективна ступінь деформації дорівнюватиме відповідній одиничній деформації; у межах окремого етапу технологічного процесу, що складається з декількох

незавершених технологічних циклів (без термічної обробки), ефективна ступінь деформації визначається співвідношенням (5.18).

У межах технологічного циклу відбувається зміна механічних властивостей заготовок унаслідок деформаційного зміцнення (напівцикл зміцнення) і повне або часткове відновлення цих властивостей внаслідок знеміцнення з подальшою термообробкою (напівцикл знеміцнення). У такому разі для визначення ефективного ступеня деформації слід урахувати залишкове деформаційне зміцнення.

Згідно з феноменологічною теорією руйнування як запобіжне пошкодження матеріалу заготовки застосовують ступінь використання ресурсу пластичності ω , що визначається, наприклад, за співвідношенням:

$$\omega = (e_i / e_{ip})^\alpha,$$

де e_i – ступінь деформації, необхідний для отримання кінцевої заготовки; e_{ip} – граничний за критерієм руйнування ступінь деформації; $\alpha = \alpha_0^{1+0,14K}$; α_0 – характеристика матеріалу заготовки; K – показник жорсткості схеми напруженого стану.

Згідно з роботою [96], за $\omega \leq 0,25$ відбувається повне знеміцнення та відновлення вихідної структури і механічних властивостей матеріалу. Отже, для малих ступенів деформації можна вважати, що після завершення знеміцнення технологічного циклу $e_{i\text{эф}} = 0$.

За $0,25 < \omega \leq 0,65$ не відбувається повного відновлення структури і властивостей, тому можна вважати, що зберігається залишкове деформаційне зміцнення, відповідне залишковій ефективній деформації $e_{i\text{эф}} < 0$.

З огляду термодинаміки зміна стану системи, що деформується однозначно, характеризується зміною внутрішньої енергії dU , яку на підставі закону збереження енергії визначають так:

$$dU = \sum_j^{N_c} dQ_j, \quad (5.19)$$

де N_C – кількість реалізованих при обробці форм технологічного руху;
 dQ_j – елементарна узагальнена робота.

Для визначення ефективного ступеня деформації після виконання завершеного технологічного циклу запишемо рівність (5.19) у такому вигляді:

$$dU = \sum_{j=1}^2 dQ_j = dA_{y\phi} - dQ_T$$

де dQ_j – узагальнена питома робота, яка дорівнює алгебраїчній сумі елементарних робіт різного спрямування, що підлягають законам адитивності та комутативності; $dA_{y\phi}$ – питома робота формозмінювання, $dA_{y\phi} = \Phi(\varepsilon_i) d\varepsilon_i$; $\Phi(\varepsilon_i) = \sigma(\varepsilon_i)$ – інтенсивність напружень в осередку пластичної деформації на штампувальній операції; $dQ_T = T(dS_T - dS_G)$; dS_T, dS_G – зміна щільності ентропії, обумовлена теплообміном з навколишнім середовищем і дисипацією енергії деформації [96].

$$de_{\phi}^j = \frac{\sigma_i^j(e_i^j) de_i^j}{\sigma_{i\phi}^j(e_{i\phi}^j)} (1 - K_T^j), \quad (5.20)$$

де K_T^j – коефіцієнт ефективності термообробки,

$$K_T^j = \frac{T^j dS_{\Sigma}^j}{\sigma_i^j(e_i^j) de_i^j} \quad (5.21)$$

Для апроксимації функції $\sigma_i^j(e_i^j)$ у рівнянні (5.21) для аналізу процесів листового штампування найчастіше застосовують ступінь залежності такого вигляду:

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^n \text{ при } 0,002 \leq e_i \leq 2\varepsilon_{iy}; \quad (5.22)$$

$$\sigma_i = \sigma_{iy} \cdot 2^n (1 + 0,5\varepsilon_i - \varepsilon_{iy}) \text{ при } 2\varepsilon_{iy} \leq e_i \leq \varepsilon_{ip} \quad (5.23)$$

де $n = \varepsilon_{iy}$; ε_{iy} та σ_{iy} – граничні за критерієм утрати стійкості інтенсивності деформацій та інтенсивність напружень.

Прийнявши допущення, що $K_T = f(e_i)$, після підстановки залежностей (5.22), (5.23) у рівняння (5.21), отримаємо:

$$e_{i\phi}^j = e_i^j (1 - K_T^j)^{\frac{1}{1+n}} \text{ при } e_i < 2\varepsilon_{iy};$$

$$e_{i\phi}^j = e_i^j (1 - K_T^j) \text{ при } e_i > 2\varepsilon_{iy}.$$

Коефіцієнт ефективності термообробки обчислюємо за формулою

$$K_T = \frac{HV(e_i, t, \tau)}{HV(e_i)},$$

де $HV(e_i, t, \tau)$ – багатофакторна циклова модель формування твердості під час виконання завершеного технологічного циклу; $HV(e_i)$ – однофакторна модель формування твердості під час виконання незавершеного технологічного циклу.

Викладемо метод прогнозування механічних властивостей виготовлених деталей, що враховує розглянуті вище положення про вплив технологічних циклів обробки на зміцнення та знеміцнення. Основним технологічними параметрами, що визначають механічні властивості матеріалу заготовок і деталей, є ступінь деформації на штампувальних операціях, температура нагрівання і час витримки на термічних операціях.

Багатофакторні моделі враховують вплив ступеня деформації, температури та тривалості наступного відпалювання:

$$HV = 222 + 96,3e_i - 13,2T - 0,41\tau - 7,64e_iT - 0,59e_i\tau + 0,043T\tau + 0,005\tau^2;$$

$$\sigma_B = 59 + 49,9e_i - 6,1T + 0,22\tau - 3,04e_iT - 0,22e_i\tau - 0,012T\tau - 6,47e_i^2 + 0,38T^2.$$

Ступені деформації на штампувальних операціях обтискування визначаємо за залежністю [96]:

$$e_i \approx \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{d_{i-1}^j}{d_i^j},$$

де d_{i-1}^j та d_i^j – зовнішній діаметр заготовки до та після виконання операції.

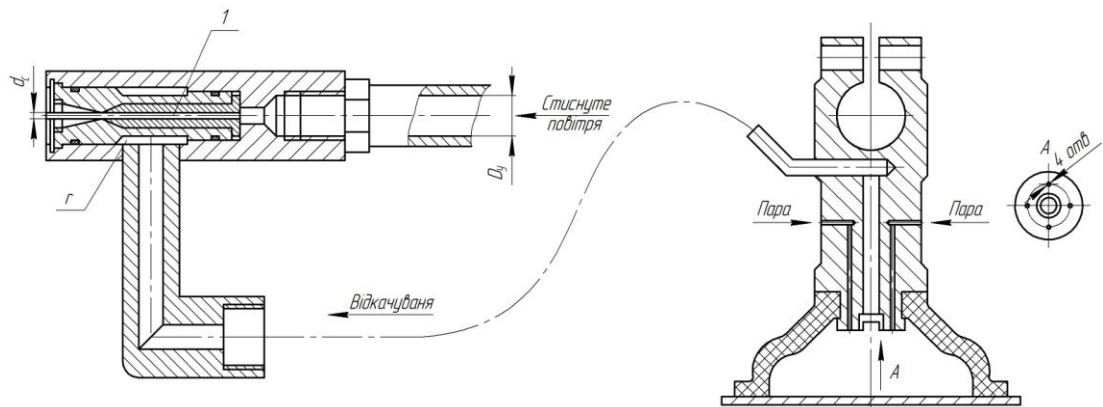
У табл. 5.2 подані значення твердості, які виміряні експериментально та розраховані за моделями, з оцінюванням похибки розрахунку.

Очевидно, що розроблені моделі формування механічних властивостей надають можливість прогнозувати механічні властивості деталей з допустимою похибкою, що дорівнює 4...5 %. Це дозволяє рекомендувати запропонований

метод для застосування під час проєктування нових технологічних процесів виготовлення виробів відповідного призначення.

5.4.1 Додаткові рекомендації

Розроблено конструкції вакуумного рихтування з імпульсним рухом поршня: механічні, пневмогідравлічні, парові. Окрім того, розроблено нові варіанти вакуумних притискань з можливістю надання додаткових розтягувальних зусиль під час рихтування (рис. 5.13–5.15) й адаптації їх до сучасних конструкцій вакуумних притискувачів. Надано рекомендації з технології рихтування елементів кузовних деталей транспортних засобів, що базуються на послідовному формуванні з локалізацією зони пошкодження.



1 – сопло ежектора

Рисунок 5.13 – Конструкція вакуумного ежекторного притискувача

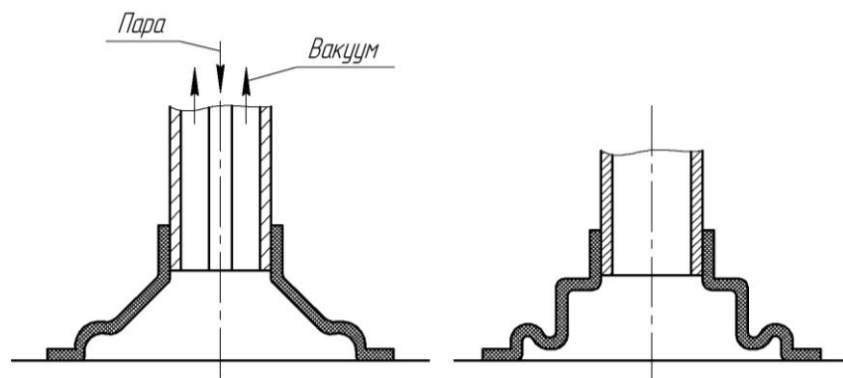
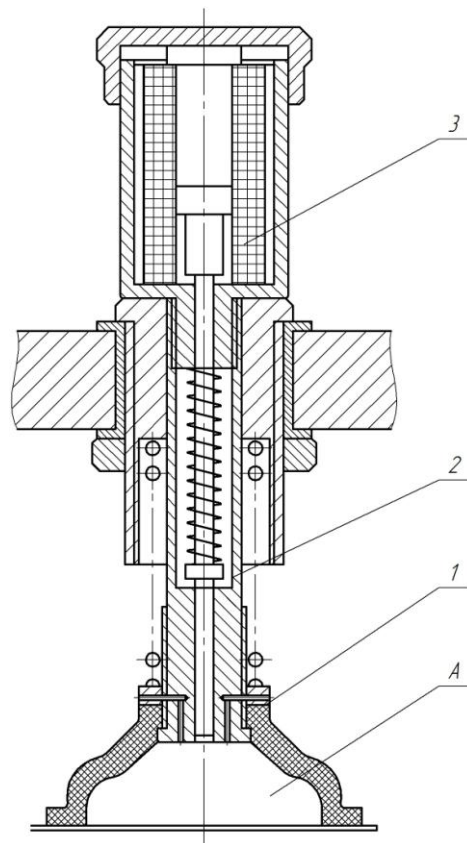


Рисунок 5.14 – Схеми рихтування



1 – гумовий присос; 2 – клапан; 3 – електромагніт

Рисунок 5.15 – Конструкція електромагнітного притискувача

Виконано комплекс робіт з підвищення ефективності ремонтного виробництва автомобільної та бронетанкової техніки з урахуванням рекомендацій наданих в роботах [123, 124]. Для виконання зварювальних робіт в умовах ремонту застосовані методики зниження деформацій на підставі ймовірного підходу [25, 125, 126].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналітичний огляд наявних і описаних у сучасній науковій літературі традиційних методів виготовлення, ремонту, експлуатації та покращення експлуатаційної надійності листових деталей транспортних засобів показав, що сучасне виробництво вимагає подальшого визначення та реалізації конструктивно-технологічних засобів підвищення ресурсу листових деталей автомобільного і залізничного транспорту на стадії проектування, виробництва та експлуатації. Показано, що сучасне ремонтне виробництво деталей транспортних засобів потребує розвитку технологій з широкими технологічними можливостями, із суттєво меншими зусиллями деформування, розвитку та науковим обґрунтуванням методів визначення ресурсу деталей.

2. Розроблено та удосконалено конструктивно-технологічні методи підвищення ресурсу листових деталей транспортних засобів на підставі моніторингу життєвого циклу та формування залежності параметрів експлуатаційних характеристик від показників схеми деформованого стану під час листового штампування.

3. Розширена класифікація листових деталей транспортних засобів за їх функціональним призначенням для формування моделі начального стану деталі та еволюції службових характеристик матеріалу в умовах експлуатації. Дослідження виконані для основних деталей серед яких ті, що піддані корозійному впливу – «Лист верхній шкворневої балки», абразивному зношенню – «Кришка люку», «Накладка», утомній міцності – «Обід колеса».

4. Розроблено метод розрахунку напружено-деформованого стану та еволюції властивостей матеріалу в процесі формоутворення та подальшої експлуатації унаслідок синтезу моделей технологічного процесу, еволюції службових параметрів, зношування деталей, накопичення ушкоджень, відновлюваного ремонту з визначенням необхідності його першого застосування. Розроблено математичну модель розрахунку силових параметрів рихтування кузовних деталей транспортних засобів вакуумом.

5. Експериментальні дослідження підтвердили можливість одержання якісних плоских деталей із прямолінійним рифтом методами гнуття. Адекватність математичної моделі для визначення стріли прогину та напружено-деформованого стану експериментальним даним підтверджується критерієм Фішера за довірчою вірогідністю 0,95, межа похибок розрахована за дисперсією адекватності, складає $\pm 9\%$, рівень значущості – 0,05. Результати дослідів за замірами зусиль гнуття, стріли прогину, розподілу деформацій та напружень заготовки підтверджують достовірність отриманих теоретичних залежностей. Установлено, що потрібне зусилля унаслідок вільного вигинання зменшується у 2–3 рази, порівняно з гнуттям в інструментальних штампах.

6. Виконано математичне моделювання процесу штампування закінцівки рифту під час вільної формозміни закінцівки рифту без контакту з жорстким інструментом і циліндричної ділянки рифту в умовах контакту з інструментом. Під час формування без утягання плоского елемента заготовки відбувається її руйнування в зоні сполучення із закінцівкою рифту, під час витягування понад (8–10) % і формування–витягування з жорсткого пуансону руйнування не відбувається, але утворюються гофри в зоні сполучення закінцівки рифту з плоским елементом, під час формування-витягування укороченим пуансоном частина закінцівки рифту (понад 70 %) формується вільно, розривання заготовки та утворення гофрів не відбувається.

7. Розроблено експериментально-аналітичний метод оцінювання ресурсу листових деталей транспортних засобів (ободів коліс), що працюють на втомну міцність, з порівнянням оптимального деформованого стану з огляду забезпечення максимального ресурсу деталей з реалізованим унаслідок формоутворення.

8. Результати дисертаційної роботи у вигляді методів розрахунку, залежності для розрахунку параметрів процесу, а також рекомендацій щодо удосконалення технологічних процесів передані для промислового освоєння під час розробки технологічного процесу й інструментального оснащення для штампування листових деталей з елементами жорсткості деталей типу

«Накладка» на ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (м. Кременчук), «Кришка люка» на ПрАТ «АвтоКрАЗ» (м. Кременчук), зварних листових деталей контейнерів на ПАТ «Кременчуцький завод металевих виробів» (м. Кременчук), рекомендації з усунення залишкових напружень на ПП «Євротранс-сервіс» і ТОВ «АТП-15307» (м. Кременчук). Результати досліджень упроваджені в навчальний процес у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського для викладання навчальних дисциплін.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Исаченков Е. И., Пихтовников Р. В. К вопросу влияния скорости деформирования на процесс штамповки деталей из листа. *Вестник машиностроения*. 1952. № 5. С. 21–23.
2. Фролов Е. А. Новый метод штамповки деталей из листа энергией детонирующих газовых смесей. Импульсная обработка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1979. 130 с.
3. Радзивончик В. Ф. Расчет зарядов. В кн. *«Импульсная обработка металлов давлением»*. Вып.1. Харьков, 1970. С. 60–66.
4. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. 520 с.
5. Исаченков Е. И. Штамповка резиной и жидкостью. М.: Машиностроение, 1967. 366 с.
6. Головлев В. Д. Расчеты процессов листовой штамповки (Устойчивость формообразования тонколистового металла). М.: Машиностроение, 1974. 136 с.
7. Яковлев С. С., Трегубов В. И., Ремнев К. С. Ротационная вытяжка с утонением стенки трубных заготовок из анизотропного материала. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением: Научно-технический и производственный журнал*. 2011. М. № 11. С. 10–16.
8. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. М.: Машиностроение, 1971. 200 с.
9. Ковалев В. Г., Ковалев С. В. Технология листовой штамповки. Технологическое обеспечение точности и стойкости. М.: КНОРУС, 2010. 224 с.
10. Огородников В. А., Деревенько И. А., Сивак Р. И. О влиянии кривизны траекторий деформирования объема металла при обработке давлением на его пластичность в условиях сложного нагружения. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2018. № 3. С. 37–42.

11. Огородников В. А., Деревенько И. А., Алиева Л. И. Параметры напряженного состояния диаграмм пластичности. *Вестник ДГМА*. 2012. № 4. С. 10–18.
12. Огородников В. А. Влияние гидростатического давления на пластичность металлов. *Физика и техника высоких давлений*. 2007. № 2, том 17, С. 7–11.
13. Огородников В. А., Алиева Л. И., Кожушаный В. М., Деревенько И. А. Параметры модели, формирующей карту материала в процессах обработки давлением. *Обробка матеріалів тиском*. 2011. № 1. С. 98–98.
14. Огородников В. А., Грушко А. В., Гуцалюк А. В. Выбор критериев деформируемости при оценке использованного ресурса пластичности в процессах обработки металлов давлением. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2014. № 43. С. 127–136.
15. Алиева Л. И. Критерии деформируемости и возможности их использования в задачах обработки давлением. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2016. № 2. С. 17–21.
16. Кухарь В. Д., Яковлев С. С., Ремнев К. С. Влияние технологических параметров на устойчивость процесса вытяжки осесимметричных деталей из анизотропных заготовок. *Научно-технический и производственный журнал «Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением»*. 2011. № 11. С. 3–9.
17. Каргин С. Б., Марков О. Е., Кухарь В. В. Теоретический анализ напряженно-деформированного состояния слитка при ковке на трехлепестковую заготовку. *Обработка материалов давлением: Сб. научн. трудов. Краматорск : ДГМА*. 2011. № 1 (26). С. 17–21.
18. Пасько А. Н., Алексеев Д. А. Математическое моделирование процессов гидравлической и гидромеханической формовки. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением: Научно-технический и производственный журнал. М.* 2011. № 11. С. 45–47.

19. Плєснєцов Ю. О., Забара О. С., Коворотний Т. Л., Любімов М. С. Аналіз Сучасного стану виробництва гнутих профілів замкнутого перетину. *Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ». 2010. № 43. С. 172.*
20. Мельников Э. Л. Холодная штамповка днищ. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.
21. Колганов И. М., Проскуряков Г. В., Колганов В. И. Формообразование листовых профилей повышенной жесткости при волочении. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1982. № 5 С. 23–25.
22. Колганов И. М., Проскуряков Г. В., Богданов Б. В. и др.. Расширение технологических возможностей формообразования профилей из листовых заготовок. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1987. № 2 С. 18–20.
23. Григорьев Л. Л. Рациональные варианты холодной штамповки. Технично-економические критерии. Л.: Машиностроение, 1975. 232 с.
24. Елизаветин М. А., Сатель Э. А. Технологические способы повышения долговечности машин. М. : Машиностроение, 1969. 400 с.
25. Бакалець Д. В., Савуляк В. І. Підвищення надійності та відновлення металоконструкцій транспортних та сільськогосподарських машин. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. № 11 т.2 (66), 2012. С. 302–306.
26. Балакин В. Ф., Бейгельзимер Я. Е., Гальченко Г. Ю., Богдан Д. А. Исследование коррозионной стойкости горячекатанных труб, подвергнутых поверхностному пластическому деформированию с использованием ингибиторов коррозии. *Збірник наукових праць ДДТУ. Технічні науки*. Тем. вип. 2020. С. 80–86.
27. 110. Гребенников А. Г., Гуменный А. М., Трубаев С. В., Гребников В. А., Сунь Ифан. Методы обеспечения ресурсных характеристик типовых конструктивных элементов самолетных конструкций. *Міжнародна науково-*

технічна конференція «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки». 2020. С. 11.

28. Вдовин С. И. Методы расчёта и проектирования на ЭВМ процессов штамповки листовых и профильных заготовок. М. : Машиностроение, 1988. 160 с.

29. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. 280 с.

30. Шлык С. В., Драгобецкий В. В., Мосьпан Д. В. Сопоставление энергетических затрат при штамповке прокольного рифта формовкой и гибкой. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Кременчук : КрНУ*. 2012. Вип. 2/2012 (73). С. 131–134.

31. Огородников В. А. Оцінка деформованості металу при обробці тиску. Київ : Вища школа. Головне видавництво, 1983. 175 с.

32. Огородников В. А., Киселев В. Б., Сивак И. О. Энергия. Деформации. Разрушение. Винница: УНЕВІРСУМ-Вінниця, 2005. 204 с.

33. Можаровський М. С. Теорія потужності, пластичності і повзучості : підручник. К.: Вища шк., 2002. 308 с.

34. Черныш А. А., Прудников Г. В., Черкащенко В. Ю. и др. Применение конечно-элементных аппроксимаций в экспериментальных исследованиях процесса формовки прямолинейного рифта. *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. Краматорск: ДГМА*. 2013. Вип. 2/2013 (35). С. 19–24.

35. Сабонадьер Ж. К., Кулон Ж. Л. Метод конечных элементов и САПР. М.: Мир, 1989. 187 с.

36. Чемоданова Т. В. Pro/ENGINEER: Деталь, Сборка, Чертеж. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 560 с.

37. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. справочное пособие / под ред. Б. С. Касаткина. К.: Наукова думка, 1981. 584 с.

38. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных: Пер. с англ. Д. К. Монтгомери. Л.: Судостроение, 1980. 384 с.

39. Тензометрия в машиностроении, под ред. Д. А. Макарова. М.: Машиностроение, 1975. 317 с.
40. Дайчин В. А. Методы и средства натурной тензометрии. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
41. Воронцов В. К., Полухин П. И., Белевитин В. А. и др. Экспериментальные методы механики деформируемых тел (технологические задачи обработки давлением). М.: Металлургия, 1990. 480 с.
42. Малинин М. М. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
43. Аркулис Г. Э., Дорогобид В. Г. Теория пластичности. М.: Машиностроение, 1987. 352 с.
44. Беженев С. А., Беженев А. И., Коцюба В. Ю., Пахолка С. Н. К вопросу оценки характеристик сопротивления усталости конструкционных материалов. *Вестник двигателестроения. Запорожье: АО «МОТОР СИЧ»*. 2004. № 4. С. 66–71.
45. Беженев С. А., Коцюба В. Ю., Пахолка С. Н., Беженев А. И., Соболевская Т. Д. Особенности морфологии и прочность конструкционных сталей. *Вестник двигателестроения. Запорожье: АО «МОТОР СИЧ»*. 2009. № 2. С. 133–138.
46. Беженев С. А., Коцюба В. Ю., Пахолка С. Н., Беженев А. И. К вопросу эффективности экспериментального определения работоспособности конструкционного материала в условиях многоциклового усталости. *Вестник двигателестроения. Запорожье: АО «МОТОР СИЧ»*. 2011. № 1. С. 14–18.
47. Павленко Д. В., Коцюба В. Ю., Пахолка С. Н. Формирование субмикроструктурной структуры в серийных и перспективных материалах лопаток ГТД. *Авиационно-космическая техника и технология. Харьков: ХАИ*. 2015. Вып. 10/127. С. 33–39.
48. Богуслаев В. А., Коцюба В. Ю., Павленко Д. В., Ткач Д. В. Устранение разнотекучести в лопатках компрессора ГТД интенсивной пластической

деформацией. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научных трудов. Дн-вск.: ПГАСА*. 2015. Вып. 80. С. 373–379.

49. Лысов М. И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. М.: Главполиграфпром, 1966. 236 с.

50. Мошнин Е. Н. Гибка, обтяжка и правка на прессах. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1959. 360 с.

51. Исаченков Е. И. Контактное трение и смазка при обработке металлов давлением. М.: Машиностроение, 1978. 208 с.

52. Жарков В. А., Ерофеев А. В., Ананченко И. Ю. Малоотходная технология штамповки кузовных деталей. *Автомобильная промышленность*. 1989. № 6. С. 24–25.

53. Ершов В. И., Глазков В. И., Каширин М. Ф. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1990. 312 с.

54. Стеблюк В. И., Некрасов А. Г., Семеренко И. Л. Определение оптимального температурного поля при глубокой вытяжке с дифференцированным нагревом. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1989. № 11. С. 32–34.

55. Чигиринский В. В., Мазур В. Л., Бергеман Г. В. и др. Производство высокоэффективного металлопроката: Монография. Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. 262 с.

56. Шумейко П. Д., Дубина В. И. Совершенствование процессов холодной листовой штамповки путем формирования рельефа. *Эффективные технологические процессы в листовой штамповке: Тез. докл. НТК*. М.: ЦРДЗ, 1993. С. 59–66.

57. Сивак І. О., Савуляк В. В. Штампування гофрованих заготовок з використанням гідростатичного підпору. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні.: Тематич. зб. наук. пр. ДДМА, Краматорськ*. 2004. С. 331–335.

58. Морозенко В. М., Кузнецов Е. В. Резонансный вибропластический эффект. *Металлы*. 2000. №3. С. 104–107.

59. Дидык Р. П., Кузнецов Е. В., Балакин В. Ф. Резонансный вибропластический эффект в обработке металлов давлением. *Наукові вісті. Том 5. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: «Системні технології»*. 2002. С. 365–369.

60. Дель Г. Д., Определение напряжений в пластической по распределению твердости. М.: Машиностроение, 1971. 199 с.

61. Плєснєцов Ю. О., Забара О. С., Коворотний Т. Л., Любімов М. С. Аналіз Сучасного стану виробництва гнутих профілів замкнутого перетину. *Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ»*. 2010. № 43. 172 с.

62. Березовская А. М. Экспресс-испытания холоднокатаного автолиста на штампуемость. *Автомобильная промышленность*. 1988. № 7. С. 32.

63. Бубнов В. М., Кебал И. Ю., Манкевич Н. Б. Совершенствование технологии ремонта специализированных грузовых вагонов. *Наука та ремонт засобів транспорту*. 2016. № 1. С. 62–70.

64. Воропай В. С. Разработка метода принятия решения относительно вагона-цистерны с истекшим назначенным сроком службы в условиях окончания III стадии жизненного цикла. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2009. Вип. 26. С. 201–204.

65. Куличенко А. Я. Основы розробки оптимальних технологічних процесів ремонту залізничних вагонів. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2009. Вип. 26. С. 15–17.

66. Герасименко О. Н., Тлимбенко А. Х. Листоштамповочные комплексы для серийного и мелкосерийного производства. М.: Машиностроение, 1987. 128 с.

67. Чернышев М. Д., Щеголева Т. Н. Технология – важнейшее средство экономии металлопроката. *Автомобильная промышленность*. 1989. № 3. С. 5–6.
68. Николаев М. Б. Оценка и анализ уровня технологий. *Автомобильная промышленность*. 1984. № 4. С. 22–23.
69. Афанасьев А. П., Прокофьев А. С., Скоблов Л. С., Садеев И. И. Опыт листовой штамповки деталей из алюминия. *Автомобильная промышленность*. 1984. № 4. С. 24–25.
70. Соколов Ю. Л. Малоотходная технология – средство повышения производительности труда и снижения металлоемкости изделия. *Автомобильная промышленность*. 1982. № 2. С. 25–26.
71. Ильин Л. Н., Смирнов А. М. Системный анализ листоштамповочного производства на основе фаз жизненного цикла изделия. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1991. № 2. С. 7–9.
72. Махненко В. И. Ресурс безопасности эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций. Киев: Наукова думка, 2006. 618 с.
73. Сенчиков И. К., Рябцев И. А., Турык Е. Структурная схема методики расчета напряженно-деформированного состояния деталей в процессе наплавки и последующей эксплуатации. *Автоматическая сварка*. 2015. № 5–6. С. 138–141.
74. Самойлов Г. А., Рубаненко А. В., Рябинин С. А. Форсированные испытания несущих систем грузовых автомобилей. *Автомобильная промышленность*. 1988. № 1. С. 6–8.
75. Гусаров А. П., Журавлев В. Н. Пути ускорения и повышения эффективности испытаний. *Автомобильная промышленность*. № 11, 1988. С. 35–37.
76. Нестеренко А. М., Гайдук В. В., Ляховецкая Л. Л. Коррозионная стойкость листовых сталей при обработке. *Автомобильная промышленность*. 1989. № 11. С. 32.

77. Гнатов А. В. Бесконтактная внешняя магнитно-импульсная рихтовка автомобильных кузовов. *Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр.* 2012. Вип. 134. С. 131-134.

78. Березняцький В. В. Вдосконалення організації ремонту автомобілів з застосуванням лінгвістичного підходу. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник.* 2021. Вип. 1 (48), С. 31–36.

79. Посвятенко Е. К., Посвятенко Н.І., Рибак І. П. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин рельєфами поверхні. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник.* 2021. Вип. 1 (48). С. 270–282.

80. Посвятенко Е. К., Аксьом П. А. Розробка наукових основ поліпшення оброблюваності деталей транспортних засобів із аустенітних сталей. *Управління проектами, системний аналіз і логістика: Серія технічні науки. Ч.1. К.: НТУ.* 2016. № 18. С. 94–100.

81. Posviatenko E., Posviatenko N., Budyak R. and other. Influence of material and the technological factors on improvement of operating properties of machine parts by reliefs and film coatings. *EasternEuropean journal of enterprise technologies.* 2018. № 5/12 (95). P. 48–56.

82. Рубан Д. П., Крайник Л. В., Гришук О. К. Умови та заходи по підвищенню довговічності кузовів автобусів громадського транспорту під час експлуатації. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник.* 2021. Вип. 1 (48), С. 293–301.

83. Посвятенко Е. К., Аксьом П. А., Посвятенко Н. І. Вплив попередньої холодної деформації і рослинних мастильно–охолоджуючих рідин на фізико–механічні та технологічні властивості аустенітних сталей. *Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.–техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ».* 2018. Вып. 88. С. 172–178.

84. Посвятенко Е. К., Аксьом П. А. Про природу впливу деформаційного зміцнення на оброблюваність аустенітних сталей. *Вісник Національного*

транспортного університету. Серія «Технічні науки». Наук.–техн. зб. К.: НТУ. 2019. Вип. 3 (45). С. 113–121.

85. Стеклов О. В. міцність зварних конструкцій в агресивних середовищах. М. : Машинобудування, 1976. 200 с.

86. Романовський В. П. Довідник з холодного штампування. Л: Машинобудування, 1979. 520 с.

87. Драгобецкий В. В., Мороз Н. Н., Савелов Д. В., Наумова Е. А. Определение параметров идеального пластического процесса. *Сборник научных трудов «вест ник національного технического университета «ХПИ»*. 2010. № 43, С. 52–56.

88. Драгобецкий В. В., Троцко О. В., Черкащенко В. Ю. Определение параметров процесса гибки дуг пассажирских вагонов. Методи вирішення проблеми сучасних транспортних технологій: колективна монографія. Харків, 2012. С. 254–265.

89. Драгобецкий В. В., Черныш А. А., Мороз Н. Н. Совершенствование метода расчета процессов формоизменения листовых автокузовных деталей. *Вісник СевНТУ: Збірник наукових праць Севастопольського національного технічного університету: Серія: Машиноприладобудування та транспорт, Севастополь*. 2013. Вип. 143. С. 138–141.

90. Дрозд М. С., Матлін М. М., Сидякін Ю.І . Інженерні розрахунки пружопластичної контактної деформації. М.: Машинобудування, 1986. 224 с.

91. Драгобецкий В. В., Шаповал А. А., Мосьпан Д. В., Лотоус В. В. Упрочнение зубьев ковшей экскаваторов с использованием пластической деформации взрывом. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 2. С. 38–42.

92. Лотоус В. В., Загирняк М. В., Драгобецкий В. В. Оптимизация параметров пластического деформирования при упрочнении деталей горного оборудования. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: науково-виробничий журнал. Кременчук : КрНУ*. 2013. Вип. 2/2013 (12). С. 97–105.

93. Лотоус В. В., Наумова Е. А., Драгобецкий В. В. Повышение износостойкости зубьев ковшей экскаваторов при избирательном взрывном упрочнении. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: науково-виробничий журнал. Кременчук: КрНУ. 2014. Вип. 2/2014 (14). С. 157–164.*

94. Лотоус В. В., Драгобецкий В. В. Повышение эффективности упрочнения зубьев ковшей экскаваторов. XII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні технології ведення буровибухових робіт, їх економічна ефективність і техногенна безпека»: : матер. конференції, 03–10 вересня 2013 р., Бургас. Кременчук. 2013. С. 15–17.

95. Dragobetskii V. V., Mospan D. V., Trotsko O. V., Lotous V. V. Excavator bucket teeth strengthening using a plastic explosive deformation. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. No. 4. P. 363–368.

96. Драгобецький В. В., Шаповал О. О., Щепетов В. В., Загірняк М. В., Лотоус В. В., Леготкін, Л. І. Слепинін, Чигиринський В. В., Кресанов Ю. С. Керовані ефекти пластичного деформування заготовок виробів для металургії та транспорту: монографія. Харків: «Друкарня Мадрид». 2017. 244 с.

97. Гнатов А. В., Трунова И. С., Шиндерук С. А. Экспериментальные исследования коэффициента передачи энергии в зависимости от индуктивной нагрузки в согласующем устройстве дискового типа. *Автомобильный транспорт*. 2012. № 31. С. 159–167.

98. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Трунова И. С., Шиндерук С. А. Бесконтактные магнитно-импульсные технологии для рихтовки кузовов транспортных средств: материалы пятой международной научно-практической конференции, под редакцией О. Н.Ларина, Ю. В. Рождественского. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. 313 с.

99. Гнатов А. В., Батыгин Ю. В., Чаплыгин Е. А. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Магнитно-импульсные технологии бесконтактной рихтовки кузовных элементов автомобиля. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 242 с.

100. Гнатов А. В. Прогрессивные магнитно-импульсные технологии на транспорте. *Науковий вісник*. 2011. № 1. С. 147–156.

101. Batygin Yuri V., Golovashchenko Sergey F., Gnatov Andrey V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – Fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology, Elsevier*. 2013. № 213 (3). P. 444–452.

102. Батыгин Ю. В., Гнатов А. В., Трунова И. С. Магнитно-импульсные технологии для восстановления корпусных элементов транспортных средств. Часть 1. Актуальность и перспективность направления МИОМ. Пути решения. *Науковий вісник ХДМА*. 2013. № 1. С. 104–111.

103. Гнатов А. В. Внешняя бесконтактная рихтовка кузовных панелей автомобилей. *Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр.* 2013. Вип. 142. С. 61–64.

104. Гнатов А. В. Бесконтактне магнітно-імпульсне рихтування автомобільних кузовів. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2010. № 2. С. 164–171.

105. Гнатов А. В. Прогрессивные магнитно-импульсные технологии на транспорте. Третья Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні технології на транспорті» *MINTT*. 2011. Херсон: ХДМІ. 2011. С. 232-239.

106. Лотоус В. В., Чебенко Ю. Н., Драгобецкий В. В. Эвристические приемы поиска технических решений упрочнения деталей горного оборудования. Матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції «Розробка, використання та екологічна безпека сучасних гранульованих та емульсійних вибухових речовин»: матер. конференції, 04–09 лютого 2013 р. *Кременчук–Свялява*. 2013. С. 31–33.

107. Трушевская Л. П., Драгобецкая Л. М., Драгобецкий В. В. Применение морфологического анализа при выборе и прогнозировании технологии листового проката. *Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПУ, Кременчуг КГПУ*. 2001. Вып. 1/2001 (10). С. 399–401.

108. Драгобецкий В. В. Обобщенные оценочные модели разрушения деформируемых материалов. *Сборник научных трудов. Алчевск: ДГМИ. 2002. Вып. 16. С. 128–136.*
109. Добровольский А. Г., Кошеленко П. И. Абразивная износостойкость материалов : Справочное пособие. Киев : Техника, 1989. 126 с.
110. Swain M. V. Microfracture about scratches in brittle solids. *Proceeding of Royal Society. London. 1979. A366 № 1727. P. 575–597.*
111. Ткачев В. К. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. М.: Машиностроение, 1971. 264 с.
112. Хрущев М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 251с.
113. Рейш А. К. Повышение износостойкости строительных и дорожных машин. М.: Машиностроение, 1986. 184 с.
114. Приймак А. В., Онипко О. Б. Удосконалення процесу моніторингу надійності виробів авіаційної техніки за даними про їх експлуатацію. Міжнародна науково-технічна конференція *«Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки»*. 2020. С. 18.
115. Топал М. С., Андрющенко В. М. Аналіз впливу корозійних пошкоджень конструктивних елементів повітряних суден із алюмінієвих сплавів від насиченої nAsL вологи в умовах вологого тропічного клімату на їх циклічну довговічність. Міжнародна науково-технічна конференція *«Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки»*. 2020. С. 22–23.
116. Поспелов Л. А., Долматов А. І., Третяк В. В., Федорова А. С., Онопченко А. В. Спосіб розпушення змерзлого сипкого вантажу у вагоні. Міжнародна науково-технічна конференція *«Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки»*. 2020. С. 67.
117. Майорова Е. В., Журибеда М. Н. Формирование классификатора основных этапов жизненного цикла конструкций агрегатов самолета из полимерных композитов. Міжнародна науково-технічна конференція

«Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки». 2020. С. 91–92.

118. Томленов А. Д. Теория пластического деформирования металлов. М. : Металлургия. 1972. 408 с.

119. Kovaci H., Bozkurt Y. B., Yetim A. F. [та ін.] «The effect of surface plastic deformation produced by shot peening on corrosion behavior of a low-alloy steel». *Surface and Coatings Technology*. 2019, vol. 360, P. 78–86.

120. Драгобецкий В. В., Мосьпан Д. В., Мороз Н. Н. Высокоэффективные технологии самопроизвольного формоизменения тонколистовых заготовок. *Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением: международ. науч.-техн. конф. Балт.гос.техн.ун-т. СПб., 2009. С.77–81.*

121. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М.: Мир, 1987. 542 с.

122. Божидарник В. В., Сулим Г. Т. Елементи теорії пружності. Львів: Світ, 1994. 560 с.

123. Дудукалов Ю. В. Підвищення ефективності ремонтного виробництва з застосуванням технологій комп'ютерного інжинірингу. *Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки*. Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції, 17-19 травня. 2017. С. 117-118.

124. Казан П. І. Перспективи розвитку рухомих засобів технічного обслуговування і ремонту автомобільної і бронетанкової техніки. *Актуальні проблеми проектування, виготовлення і експлуатації озброєння та військової техніки*. Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції. 17-19 травня 2017. С. 147–149.

125. Гедрович А. И., Друзь О. Н. Ресурсосберегающий метод регулирования размеров зоны пластических деформаций при локальном введении тепла в металлоконструкции. *Ресурсозберігаючі технології*

виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. 2003. Ч. 1, С. 183–190.

126. Гедрович А. И., Друзь О. Н. Поиск ресурсосберегающих технологий для уменьшения остаточных напряжений и деформаций металлоконструкций. *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. 2002. С. 214–220.*

ДОДАТКИ

Таблиця 1 – Результати реєстрації прогинів і зусиль для пластин розміром 90х20мм

№ пор	Товщина пластини S, мм	Сталь Ст. 3	Кут відгину $\pi/4$	Кут відгину $\pi/3$	Кут відгину $17\pi/36$	Переміщення u, мм	Зусилля P, кгс
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	+	+			6,8	16,2
1	1	+	+			6,92	16,9
1	1	+	+			6,73	16,0
2	1		+			6,54	15,4
2	1		+			6,32	15,0
2	1		+			6,73	14,7
3	1	+		+		9,73	21,1
3	1	+		+		9,79	19,9
3	1	+		+		9,85	20,3
4	1			+		9,22	18,2
4	1			+		9,02	17,8
4	1			+		9,01	17,9
5	1	+			+	11,02	38,3
5	1	+			+	10,95	38,5
5	1	+			+	10,98	39,2
6	1				+	9,76	32,8
6	1				+	9,89	33,4
6	1				+	9,54	33,7
7	1,5	+	+			7,04	22,7
7	1,5	+	+			7,12	23,4
7	1,5	+	+			6,97	23,9
8	1,5		+			6,72	20,7
1	2	3	4	5	6	7	8

8	1,5		+			6,65	19,4
8	1,5		+			6,78	19,9
9	1,5	+		+		9,92	30,4
9	1,5	+		+		9,76	31,8
9	1,5	+		+		9,98	31,2
10	1,5			+		9,46	24,2
10	1,5			+		9,40	23,5
10	1,5			+		9,54	22,9
11	1,5	+			+	12,0	64,2
11	1,5	+			+	12,08	63,8
11	1,5	+			+	12,23	65,3
12	1,5				+	10,89	52,3
12	1,5				+	11,01	50,5
12	1,5				+	10,96	52,7
13	2	+	+			7,27	36,1
13	2	+	+			6,98	33,9
13	2	+	+			7,20	34,8
14	2		+			6,87	25,8
14	2		+			6,93	28,0
14	2		+			6,79	27,3
15	2	+		+		10,19	39,6
15	2	+		+		10,02	41
15	2	+		+		10,24	38,4
16	2			+		9,75	28,9
16	2			+		9,68	29,5
16	2			+		9,70	27,8
17	2	+			+	13,04	98,3
17	2	+			+	13,12	99,6
1	2	3	4	5	6	7	8

17	2	+			+	12,87	96,2
18	2				+	11,88	84,1
18	2				+	12,02	82,8
18	2				+	11,92	85,3
19	3	+	+			7,7	57,3
19	3	+	+			7,55	55,8
19	3	+	+			7,85	58,9
20	3		+			7,45	35,6
20	3		+			7,32	36,8
20	3		+			7,29	37,2
21	3	+		+		10,44	89,3
21	3	+		+		10,37	88,4
21	3	+		+		10,39	89,5
22	3			+		9,78	72,0
22	3			+		9,96	72,5
22	3			+		9,87	71,2
23	3	+			+	15,15	233,6
23	3	+			+	15,12	234,9
23	3	+			+	15,23	236,2
24	3				+	15,02	220,7
24	3				+	14,95	218,8
24	3				+	14,89	222,4

Таблиця 2 – Результати реєстрації прогинів і зусиль для пластин розміром 90х40мм

№ пор	Товщина пластини S, мм	Сталь Ст. 3	Кут відгину $\pi/4$	Кут відгину $\pi/3$	Кут відгину $17\pi/36$	Переміщення u, мм	Зусилля P, кгс
1	2	3	4	5	5	7	8
1	1	+	+			3,95	38,2
1	1	+	+			3,98	36,7
1	1	+	+			4,11	37,6
2	1		+			3,63	32,2
2	1		+			3,89	30,6
2	1		+			3,71	30,9
3	1	+		+		6,95	51,4
3	1	+		+		6,89	50,5
3	1	+		+		7,01	50,9
4	1			+		6,49	41
4	1			+		6,38	40,7
4	1			+		6,45	39,8
5	1	+			+	10,37	84,9
5	1	+			+	10,42	85,8
5	1	+			+	10,50	86
6	1				+	9,31	70,5
6	1				+	9,17	72,4
6	1				+	9,07	71,7
7	1,5	+	+			5,12	64,2
7	1,5	+	+			4,89	66,1
7	1,5	+	+			4,97	65,2
8	1,5		+			4,57	52
8	1,5		+			4,69	53,7

1	2	3	4	5	5	7	8
8	1,5		+			4,63	51,2
9	1,5	+		+		8,0	72,3
9	1,5	+		+		7,67	73
9	1,5	+		+		7,93	74,5
10	1,5			+		7,34	63,1
10	1,5			+		7,48	62,8
10	1,5			+		7,43	65,2
11	1,5	+			+	12,03	121,8
11	1,5	+			+	11,92	120,7
11	1,5	+			+	12,11	122,4
12	1,5				+	10,95	107,8
12	1,5				+	11,01	109,6
12	1,5				+	10,89	109,4
13	2	+	+			6,04	80,3
13	2	+	+			5,99	78,5
13	2	+	+			6,12	79,2
14	2		+			6,01	62,5
14	2		+			5,95	60,3
14	2		+			5,93	60,8
15	2	+		+		9,06	95,3
15	2	+		+		8,97	89,9
15	2	+		+		8,95	97,5
16	2			+		8,92	80,5
16	2			+		9,0	82
16	2			+		8,86	81,8
17	2	+			+	12,51	181,2
17	2	+			+	12,34	179,3
17	2	+			+	12,71	184

1	2	3	4	5	5	7	8
18	2				+	11,29	166,4
18	2				+	11,38	166,9
18	2				+	11,50	168
19	3	+	+			8,01	124,5
19	3	+	+			8,05	128,2
19	3	+	+			7,95	125,3
20	3		+			7,97	111,9
20	3		+			7,92	114,2
20	3		+			7,89	112,9
21	3	+		+		10,33	157
21	3	+		+		10,19	161
21	3	+		+		10,30	154
22	3			+		9,96	138
22	3			+		9,73	138,9
22	3			+		9,8	140,4
23	3	+			+	14,38	318
23	3	+			+	14,36	326
23	3	+			+	14,40	320
24	3				+	13,11	301,8
24	3				+	13,18	305
24	3				+	13,02	306,2

ПП "Євротранс-сервіс"

м.Кременчук, вул.Київська, 5, тел. 0672897929,
eurotrans-servis@ukr.net

Рахунок UA 85 322313 0000026005000038193 в АТ "Укресімбанк"
код ЄДРПОУ 33989417

№ 43

від 23.06.2021р.

Акт

**про впровадження результатів досліджень
аспіранта Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського
Молоштана Дмитра Васильовича**

Результати досліджень Молоштана Д.В., що викладені у його дослідницькій роботі, впроваджені спільно з працівниками ПП «Євротранс-сервіс», головним механіком Саленко І.М. та заступником директора з експлуатації Несторовим А.В., і використані при виконанні рехтовочних робіт облицювальних деталей та при зварювальних робіт кузовних деталей автобусів. Запропонований інструмент для динамічного та імпульсного вакуумного рихтування вм'ятин механічним та певногідравлічним приводом та з приводом насиченої пари пройшов випробовування та показав гарні результати. Також, застосовуються рекомендації з усунення залишкових напружень, що підвищують продуктивність та якість ремонтних робіт.

Директор
ПП «Євротранс-сервіс»



О.В.Кагал

ДОВІДКА (АКТ)
про використання результатів досліджень
здобувача кафедри «Технології машинобудування»
Кременчуцького національного університету
імені М. Остроградського
Молоштана Дмитра Васильовича

Результати наукових досліджень Молоштана Д.В., що викладені у його дисертаційній роботі на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук, впроваджені спільно з робітниками ПрАТ «АвтоКрАЗ» при розробці та проектуванні технологічного процесу та штампового оснащення для виготовлення деталей «кришка люка» суцільнометалевих напіввагонів для перевезення в тому числі сипучих вантажів, не потребуючих захисту від корозії. Використано також комплекс практичних рекомендації з виготовлення листових деталей автомобілів сімейства КрАЗ та елементів бронетехніки. Економічний ефект від впровадження складає понад 250 тис. грн.

Довідка не є підставою для фінансових операцій.

Директор технічний

ПрАТ «АвтоКРАЗ»



С.В. Дунь

**Публічне акціонерне товариство
«КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЗАВОД МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ»**

39621, Україна, Полтавська обл.,
м. Кременчук, вул. Крупської, 2.



тел.(05366) 6 10 17, факс(05366) 6 10 87,
email: krzmv@mail.ru

Довідка

про впровадження результатів досліджень,
проведених викладачем кафедри «Транспортних технологій» Кременчуцького
національного університету

імені Михайла Остроградського

Молоштаном Дмитром Васильовичом

Дослідження, виконані у його дисертації на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук впроваджені у процесах виготовлення листових деталей на кромкозагинальному обладнанні. Запропоновані рекомендації з розробки технологічного оснащення, конструкції технологічних параметрів листових деталей контейнерів та процесів зварювання дозволили підвищити експлуатаційні показники елементів конструкцій, знизити залишкові напруження при зварюванні, зменшити відсоток браку.

Очікуваний економічний ефект складає понад 15-20 тис. грн на десять контейнерів.

Довідка не є підставою для фінансових операцій.

Директор

ПАТ «Кременчуцький завод
металевих виробів»



Д.В. Бончковський



УКРАЇНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Полтавська обл., 39600, т./ф. (0536) 75-81-86, 75-83-69
e-mail: office@kdu.edu.ua, www.kdu.edu.ua, ЄДРПОУ 05385631

№ _____
на № _____

ДОВІДКА

з використання результатів дисертаційної роботи

Молоштана Дмитра Васильовича

«Удосконалення виробництва та ремонту листових деталей засобів транспорту
з метою підвищення ресурсу»

Результати наукових досліджень Молоштана Дмитра Васильовича впроваджені у навчальний процес під час викладання дисциплін «Спеціальні методи обробки деталей», «Нові та високоефективні технології в машинобудуванні» (кафедра технології машинобудування) та «Дослідження операцій у транспортних системах» (кафедра транспортних технологій).

Перший проректор



В. В. Никифоров

Мороз Микола Миколайович 0677716137



