

Міністерство освіти та науки України  
Вінницький національний технічний університет

**Савуляк В. І., Бакалець Д. В., Савуляк В. В.**

# **РЕМОНТ ТА ЛОКАЛЬНЕ ЗМІЦНЕННЯ РАМ ТРАНСПОРТНИХ МАШИН**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2019

---

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/506>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 629.3.023.083.5  
С13

Рекомендовано до видання Вченою Радою Вінницького національного технічного університету міністерства освіти та науки України (протокол № 11 від 31.05.2018 р.)

Рецензенти:

**О. В. Диха**, доктор технічних наук, професор

**Л. Г. Козлов**, доктор технічних наук, професор

**Савуляк, В. І.**

С13 Ремонт та локальне зміцнення рам транспортних машин : монографія [Електронний ресурс] / В. І. Савуляк, Д. В. Бакалець, В. В. Савуляк. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 120 с.

ISBN 978-966-641-762-9

В монографії викладено основні підходи до відновлення, ремонту та зміцнення рам транспортних машин. Розглянуто питання причин виникнення руйнувань, дослідження напружено-деформованого стану конструкцій та виявлення небезпечних пошкоджень. Детально вивчено причини зменшення ресурсу матеріалу рами після приварювання додаткових накладок під час ремонту або заварювання тріщин. Запропоновано технології виконання ремонтних робіт з мінімізацією негативного впливу теплових потоків процесу зварювання на міцність рам.

Монографія призначена для широкого кола інженерно-технічних працівників, науковців та студентів.

УДК 629.3.023.083.5

ISBN 978-966-641-762-9

© В. Савуляк, Д. Бакалець, В. Савуляк, 2019

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
1 КОНСТРУКЦІЇ РАМ ТРАНСПОРТНИХ МАШИН ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ЇХ ПОШКОДЖЕНЬ .....	6
1.1 Рами мобільних машин.....	6
1.2 Втрата цілісності та експлуатаційних характеристик рам транспортних засобів.....	8
1.3 Систематизація видів пошкоджень рам транспортних машин, що виникають в процесі експлуатації .....	14
2 НАПРУЖЕННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ В ЕЛЕМЕНТАХ РАМ ТА ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ.....	16
2.1 Підходи до моделювання рам транспортних машин та навантажень на них .....	16
2.2 Алгоритм моделювання ремонту рами зварюванням та реалізація програми на ЕОМ.....	19
2.3 Поля напружень та деформацій в матеріалі деталей рами під впливом зовнішніх навантажень.....	23
2.4 Локалізація напружень на небезпечних щодо руйнування ділянках металоконструкції.....	25
2.5 Механізми та розповсюджені схеми руйнівних процесів .....	26
3 ЗАПОБІГАННЯ НЕБЕЗПЕЧНОГО РУЙНУВАННЯ ТА ДЕФОРМУВАННЯ РАМ.....	34
3.1 Зміцнення небезпечних ділянок рам та відновлення їх характеристик.....	34
3.2 Аналіз технологічних рекомендацій щодо ремонту рам з тріщинами.....	36
4 ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРІЇ ПРОФІЛІВ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ АБО ВІДНОВЛЕННЯ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ .....	42
5 ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ РЕМОНТУ РАМ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....	59
5.1 Дослідження факторів впливу на технологію встановлення елементів зміцнення рами .....	59
5.1.1 Визначення розмірів та форми накладок за картиною полів напружень.....	59

5.1.2 Розробка технології приварювання накладок для зміцнення .....	61
5.1.3 Вплив радіуса округлення кутів елементів зміцнення на НДС лонжерона рами .....	65
5.2 Компенсація та зменшення впливу негативних факторів зварювання під час встановлення накладок для зміцнення .....	68
5.3 Оптимізація параметрів процесу приварювання елементів зміцнення.....	74
5.3.1 Вплив кута нахилу електрода при встановленні накладки для зміцнення на напружено-деформований стан (НДС) плоского тіла .....	76
5.3.2 Вплив кута нахилу електрода при встановленні накладки для зміцнення на НДС профілю лонжерона рами .....	79
5.4 Зона термічного впливу (ЗТВ) процесу зварювання та зменшення негативних наслідків .....	83
6 Поєднання процесів зварювання і паяння під ЧАС ремонту НА підвищення експлуатаційних характеристик рам ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ .....	87
6.1 Вплив заліковування тріщин мідними сплавами на міцність рам .....	87
6.2 Комбінування технологій ремонту тріщин .....	91
6.3 Інженерна методика виконання робіт зі зміцнення або ремонту рамних конструкцій транспортних засобів .....	100
6.4 Приклад виконання робіт з ремонту та зміцнення рами вантажного автомобіля .....	104
6.5 Витривалість нових та відремонтованих рам .....	105
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	109

## ВСТУП

У конструкціях машин надзвичайно широко застосовується схема компоновання її агрегатів та інших складальних одиниць на рамах. Така конструкція мусить забезпечити взаємне розташування всіх компонентів машини із необхідною точністю збереження цього розташування в процесі експлуатації (статична та динамічна жорсткість), сприймання навантажень та розсіювання усіх потоків енергії, які надходять в неї під час роботи або зберігання та транспортування, втомну довговічність тощо. Це значно впливає на характеристики якості машини та її привабливість щодо використання та формує техніко-економічні показники. Для машин тривалого або інтенсивного використання важливу роль відіграє їх безвідмовність та ремонтпридатність.

Без врахування зазначених вище вимог не можливо також сконструювати та виготовити раму.

Переважно для виготовлення рам використовують стандартні або спеціальні вальцьовані чи гнуті профілі з сталі. Перспективними і такими, що вже знайшли широке застосування рами з легких сплавів та композиційних матеріалів. Складаються рами з окремих деталей переважно методами зварювання, склеювання, а також паяння та клеювання.

Під час роботи рами на неї діють різнопланові регулярні та випадкові навантаження. Внаслідок цього на певних локальних ділянках рамних конструкцій виникають тріщини та інші пошкодження. Не виключене також пошкодження рам транспортних засобів внаслідок аварій та інших екстремальних впливів. Такі рами вимагають ремонту, що на практиці переважно виконується шляхом приварювання додаткових елементів зміцнення або вварювання нових ділянок замість вирізаних.

Проблемою ремонту пошкоджених ділянок рам шляхом встановлення додаткових елементів для зміцнення, а також відновлення таких зон з зародженими тріщинами, є висока ймовірність пошкодження основного металу негативними процесами, які супроводжують зварювання, як основного методу ремонту. До цих негативних процесів слід віднести потужні теплові потоки від зони зварювання, які викликають значні напруження та деформації, що виникають при цьому. Ці теплові потоки викликають також у зоні термічного впливу дифузію хімічних елементів та реструктуризацію матеріалу рами. Запобігання прояву цих та інших негативних процесів або їх нейтралізація є складною та важливою науковою проблемою, а її розв'язання має перспективи широкого практичного застосування у різних сферах машинобудування та транспорту.

Крім означених сфер результати запропонованої роботи можуть бути використаними і в інших галузях, де існує проблема виготовлення, зміцнення та ремонту металоконструкцій: енергетиці, будівництві, спеціальній техніці тощо. Подовження термінів служби металоконструкцій та економія металу за рахунок оптимізації профілів окремих навантажених ділянок, які можуть бути додатково зміцненими за запропонованими технологіями, можуть забезпечити економічний та соціальний ефекти.

# 1 КОНСТРУКЦІЇ РАМ ТРАНСПОРТНИХ МАШИН ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ЇХ ПОШКОДЖЕНЬ

## 1.1 Рами мобільних машин

У зв'язку з надзвичайно великим різноманіттям техніки аналіз конструкцій несучих рам мобільних машин доцільно виконувати з врахуванням можливих варіантів їх виготовлення [1–3]: лонжеронні, периферійні, хребтові, вилчато-хребтові, з несучою основою, решітчасті, інтегровані в кузов (Frame-in-body, UniFrame).

Як несуча конструкція системи вантажного автомобіля найчастіше застосовується лонжеронна та, рідше, хребтова рама [3]. Лонжеронна рама об'єднує дві поздовжні балки (лонжерони) і поперечки, що знаходяться між ними. Залежно від типу автомобіля лонжерони можуть встановлюватися:

- паралельно в горизонтальній площині;
- під кутом в горизонтальній площині;
- вигнутими у вертикальній площині;
- вигнутими в горизонтальній площині.

Паралельна схема лонжеронної рами застосовується, в основному, на вантажних автомобілях. Решта схем використовуються на легкових автомобілях підвищеної прохідності – позашляховиках [2].

Лонжерон є металевою балкою відкритого або закритого поперечного перерізу (закритий короб, швелер, двотавр), що має велику жорсткість на згин.

Хребтові та вилчато-хребтові несучі конструкції рам використовуються в комбайнах та інших складнопросторових машинах.

Решітчасті несучі конструкції використовують здебільшого для виготовлення кузовів автобусів, трамваїв, тролейбусів тощо.

На сьогоднішній день використовується велика різноманітність лонжеронних рам драбинного типу, представниками яких є рами автомобілів загального призначення та рами сидельних напівпричепів (рис. 1.1) – конструктивні системи із тонкостінних стрижнів. Рами автомобілів вітчизняного виробництва [2] клепані, складаються з двох повздовжніх балок швелерної форми зі змінним перерізом, виготовлених зі смугової низьколегованої сталі товщиною до 8 мм. Повздовжні балки рами виготовлені методом гарячого штампування і мають найбільшу висоту перерізу 265 мм, а ширина полиць змінюється від 60 до 80 мм. По довжині повздовжні балки з'єднані в декількох місцях поперечками за допомогою заклепок.

До поєздовжніх балок прикріплені кронштейни передньої, задньої і додаткової ресор, кронштейни бічних опор двигуна, кріплення кабіни, рульового керування та ін.



Рисунок 1.1 – Типові рами:  
а) сучасних вантажних автомобілів; б) сідельних напівпричепів

Рама сучасних автомобілів КрАЗ являє собою просторову конструкцію, що складається з двох поєздовжніх лонжеронів, пов'язаних між собою п'ятьма поперечинами [4]. Лонжерони виготовляють з гарячекатаного швелера № 30 (матеріал швелера – сталь 15ХСНД). Поперечки рам автомобілів КрАЗ штамповані і штампо-зварні зі сталі 15 товщиною 8 мм, за винятком п'ятої поперечки автомобіля КрАЗ-255Б, яку виготовляють з швелера Л 30 (матеріал-сталь 15ХСНД).

Рами сідельних напівпричепів та більшості сучасних вантажних автомобілів є суцільно зварними і можуть мати найрізноманітніші форми та розміри (див. рис. 1.1) [1]. Рама напівпричепа складається з двох довгих вигнутих балок (лонжеронів), виконаних у вигляді двотавра зі змінною висотою, пов'язаних між собою поперечинами (траверсами).

Лонжерони сідельних напівпричепів, які виготовляються за кордоном, можуть мати різні розміри, форму, металоємність і, відповідно, масу, проте всі вони у перерізі є таврами змінного профілю за висотою (до 41,5 см) і виготовлені зварюванням з листового металу товщиною від 4 до 16 мм.

Різні виробники для своїх конструкцій використовують низку марок сталей. Так, наприклад, зварні рами напівпричепів Kögel виготовляються зі сталі марки StE 460 [5]. Буква Е в назві марки вказує на виплавку сталі в електропечі, що гарантує малу кількість шкідливих



домішок (фосфору – до 0,035 %, сірки – до 0,03 %), а цифра – це межа текучості в МПа. Згідно зі стандартом, така сталь містить 0,2 % вуглецю, 0,1 ... 0,6 % кремнію, 1 ... 1,7 % марганцю, близько 1 % нікелю і 0,3 % хрому. При такому складі крихкі структури при зварюванні не утворюються, а нікель ще й зменшує схильність сталі до крихкого руйнування [6]. Але основним є те, що така сталь містить певну кількість (соті частини відсотка) ванадію, молібдену, ніобію і азоту, завдяки чому утворюються дрібні частинки стійких хімічних сполук цих елементів з вуглецем і азотом (карбонітриди), які стримують зростання зерна [7]. Ця група іменується як «сталь з карбонітридним зміцненням», оскільки через подрібнення зерна і присутність дрібних частинок істотно (на 30 ... 35 %) збільшується їх міцність. Це дає можливість, у деяких випадках, відмовитися від проведення зміцнювальної обробки – потрібні властивості можуть бути досягнуті безпосередньо після прокатування завдяки прискореному охолодженню.

Така сталь має ще одну перевагу – вона спадково дрібнозерниста, тобто при повторному нагріванні до високих температур зерно росте дуже повільно і після охолодження залишається дрібним. Тому її використання для зварних з'єднань сприяє збереженню властивостей в зоні термічного впливу і зменшенню виникнення тріщин.

## **1.2 Втрата цілісності та експлуатаційних характеристик рам транспортних засобів**

Активно опрацьовується питання оптимізації рам шляхом зменшення їх маси за рахунок зменшення товщини матеріалів, що використовуються для їх виготовлення, та шляхом оцінювання напружено-деформованого стану в деталях рам, які виникають під час експлуатації.

У роботі [44] виконано аналіз конструкції рам напівпричепів, призначених для перевезення цистерн, з використанням програм кінцево-елементного аналізу. Автори обґрунтували можливість зменшення металоємності рами напівпричепа на 27,2 % за рахунок раціонального вибору товщини поздовжніх та поперечних балок. Проте, у цих дослідженнях автори враховували лише статичні навантаження, що не зовсім коректно з врахуванням динамічних навантажень, які виникають під час руху автомобільного транспорту.



Світовий досвід експлуатації показує, що такі послаблення рам неминуче призводять до їх вигину під час експлуатації (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Вигин рами

На нашу думку, на цьому етапі розвитку машинобудування зменшення металоємності конструкцій можливе шляхом використання більш вартісних та якісних матеріалів, як це і роблять деякі відомі виробники [45, 46]. Інший більш прогресивний спосіб підвищення міцності, або відновлення (після поломки), експлуатаційних характеристик можливий за рахунок зміни профілів (перерізів) основних несучих елементів рам як на етапі виробництва, так і в процесі експлуатації [47].

Дослідження процесів руйнування, ремонту та зміцнення рамних конструкцій транспортної техніки знайшли своє відображення в обширній серії наукових праць вчених: В. П. Сахна, В. Г. Проскурякова, Л. М. Лельчука, А. В. Александрова, В. В. Панасюка, В. Л. Колмогорова, І. Г. Грабара, В. Є. Титаренка, М. Підгурського [46–62].

Рама автомобіля під час експлуатації зазнає впливу інтенсивних, безперервних і різноспрямованих динамічних навантажень, які передаються від тягово-зчіпного пристрою [48], внаслідок дії навантажень від пошкоджень на дорозі через підвіски колісної групи, а також інерційних навантажень, що виникають в процесі маневрування. Нерідко це відбувається в хімічно агресивному середовищі та з вантажем, маса якого переважно розташовується в кузові нерівномірно. Численні конструкторські розробки мають за мету дотримання необхідного балансу між мінімально можливою вагою рами і високою міцністю, а також гнучкістю і жорсткістю [49, 50]. Дуже гнучка рама схильна до зайвих деформацій і поломок встановлених на ній елементів конструкції та вузлів, а дуже жорстка рама – до більш інтенсивного руйнування її елементів та підвіски внаслідок зменшення демпфування коливань. Конструкторські пошуки в розробці рам напівпричепів спрямовані на максимально можливе зменшення затрат на матеріали

та технології виготовлення. Але потрібно враховувати, що найбільш складні та небезпечні поломки автомобілів пов'язані з ушкодженнями несучої частини.

Для металоконструкцій різного призначення не вдається забезпечити рівномірність навантажень на всі ділянки. Експлуатаційні навантаження зумовлюють протікання в матеріалах процесів деградації та руйнування [51, 52]. Окремо потрібно звернути увагу і на те, що різні ділянки протидіють також і різним видам деформації – згину або скручуванню та їх поєднанню [52]. Наслідком є різна швидкість вичерпування ресурсу та появи руйнувань. При цьому руйнування проявляється на невеликих ділянках конструкції, а решта має ще значний запас довговічності [53]. Актуальним є завдання виявити ділянки конструкції з найменшим ресурсом вже на етапі проектування та підсилити їх, а в процесі експлуатації вчасно відновити працездатність шляхом встановлення зміцнювальних додаткових елементів або заміни окремих деталей. Найбільш придатними для виконання цих завдань, як показала практика, є зварювання та споріднені технології [54].

Втомні тріщини критичних розмірів утворились на шкворневій балці трамвая (рис. 1.3).

Шляхом аналізу статистичних даних і співставлень [58–61] встановлено, що основними факторами впливу на розвиток тріщин є процеси коливальної динаміки (найчастіше вертикального напрямку). В зв'язку з цим, пропонується вимірювати відносні вертикальні переміщення точок рамного контуру в процесі експлуатації транспортного засобу для встановлення імовірнісних місць розвитку втомних руйнувань.



Рисунок 1.3 – Тріщина шкворневої балки трамвая

Результати досліджень НДС чистого згину та згину з крученням, опубліковані в роботах [66–68], виконані на натурних зразках рам (рис. 1.4), які навантажувались від спеціального приводу експериментальної установки (рис. 1.5). Вивчення результатів згинання з крученням рам показало, що критичні перерізи при крученні рамного контуру знаходяться в місцях з'єднання поперечин з лонжеронами та визначаються напруженнями заневоленого кручення  $\sigma_{\omega}$ , які виникають від сил стримування вільної депланації кінцевих перерізів поперечин вертикальними стінками лонжеронів.

Встановлена також переважаюча роль для довговічності рам згинної жорсткості лонжеронів та крутної – поперечин (90 % навантажень моментами згинання сприймаються лонжеронами, а біля 90 % навантажень моментами, що скручують раму – поперечинами).

Встановлена також переважаюча роль в рамі згинної жорсткості лонжеронів та крутної – поперечин (90 % згинальних навантажень сприймаються лонжеронами, що є аналогічним для жорсткості кручення поперечин).

В роботах [66–68] експериментально досліджено послідовність накопичення втомних тріщин на внутрішньому та зовнішньому боках вертикальної стінки лонжерона. На основі результатів досліджень виконано аналіз послідовності зростання тріщин на внутрішньому та зовнішньому боках вертикальної стінки лонжеронів. Ці результати дозволяють зрозуміти механізми та напрямки руйнування досліджуваних зон рами. Проте, через велику різноманітність конструкцій рам, їх узагальнення і поширення є проблематичним.

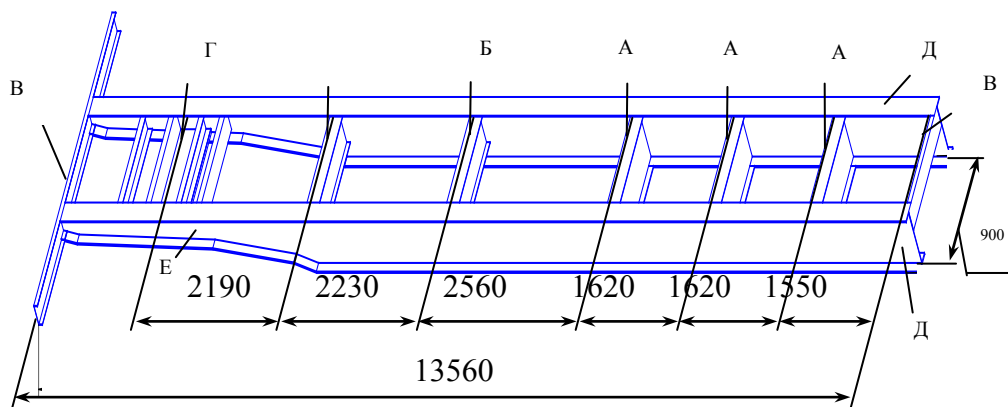


Рисунок 1.4 – Конструкція основи рами напівпричепа:

А, Б – поперечини двотаврових профілів висотою 405 і 280 мм відповідно; В – поперечини швелерного профілю висотою 140 мм; Д, Е – лонжерони двотаврового профілю з ділянками постійного (висотою 440 мм) і змінного перерізів відповідно

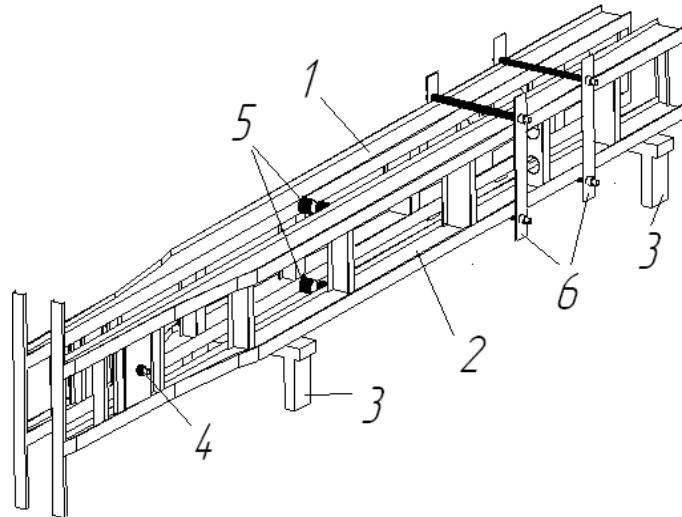


Рисунок 1.5 – Схема експериментальної установки [66–68]:  
 1, 2 – основи рам; 3 – паралельні підкладки; 4 – з’єднувальний стрижень;  
 5 – гідравлічні силонавантажувачі; 6 – з’єднувальні хомути

Схеми процесів втомного руйнування зовнішнього боку вертикальної стінки лонжерона показано на рис. 1.6 та 1.7.

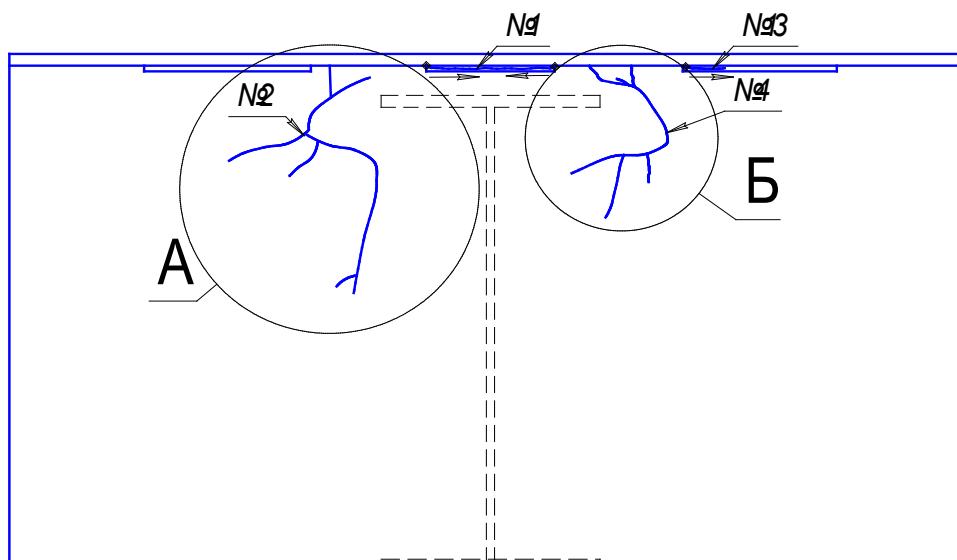


Рисунок 1.6 – Втомні тріщини на зовнішньому боці вертикальної стінки лонжерона

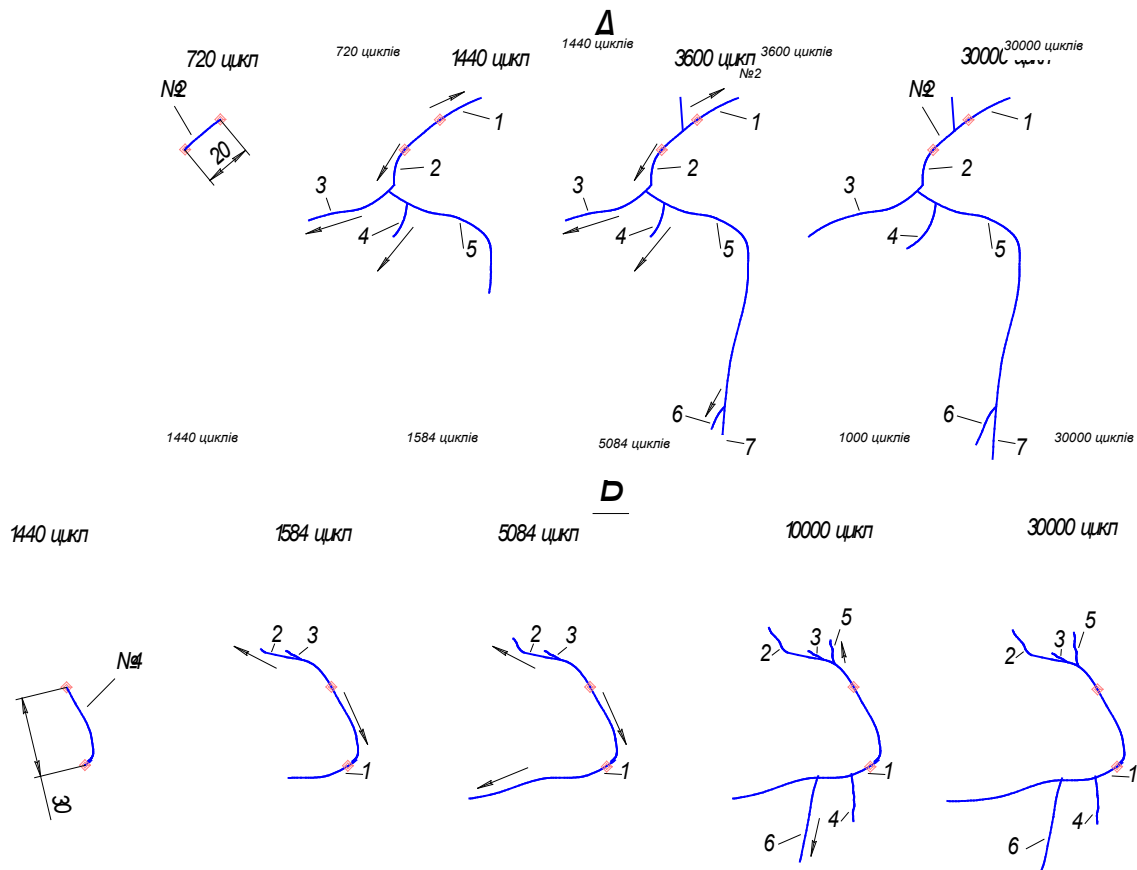


Рисунок 1.7 – Схема послідовності розвитку тріщин на зовнішньому боці вертикальної стінки лонжерона в процесі втомного руйнування під впливом циклів навантаження на установці (рис. 1.5)

Аналіз та класифікацію втомних руйнувань рам вантажних автомобілів виконано та оприлюднено в роботах [64, 70]. Всі руйнування елементів рам, що спостерігалися, вдалося розбити на порівняно невелику кількість характерних поломок. Викладені характеристики окремих груп пошкоджень деталей рами автомобілів ЗІЛ-164 зроблені на основі досліджень, виконаних в ЦНДІБК, ГОСНИТИ [71, 72] і, частково, в НДІАТ [64].

Найбільше практичне значення для автомобільного транспорту мають результати досліджень процесів виникнення поперечних тріщин повздовжніх лонжеронів, оскільки їх наслідки є особливо небезпечними. Встановлено, що найбільш імовірною є поява таких тріщин у місцях, де зосереджується дія одночасно поперечних сил та скручувальних моментів. Переважно це місця кріплення до рами підвіски, поперечин та різних агрегатів.

Іноді тріщини зароджуються навколо контуру кронштейнів, прикріплених болтами або заклепками до рами. Волога та кислотні викиди автомобілів, а також сіль, якою посипаються дороги взимку, затримуються біля них, викликають глибоку корозію (пітинги) стінок рами і є концентраторами напружень. Подібні концентратори напружень (наприклад, не заварені кратери) стають початком розвитку тріщин також і в місцях проведення ремонтних зварювальних робіт.

### **1.3 Систематизація видів пошкоджень рам транспортних машин, що виникають в процесі експлуатації**

Кількість рам засобів транспорту, що потребують поточного чи капітального ремонту, значно зросла. Дуже часто зустрічаються пошкодження, виявлені під час технічного огляду автомобілів з встановленим додатковим обладнанням (наприклад, гідроманіпулятором) та задіяних у лісопереробній галузі.

Можна виділити низку причин відмов рам таких автомобілів: збільшилася інтенсивність вантажних перевезень автомобільним транспортом, маневрова робота гідроманіпулятором виконується на підвищених швидкостях, вантажопідйомність гідроманіпуляторів збільшилась, що дозволяє скоротити терміни навантаження та розвантаження, але збільшує статичні та динамічні навантаження тощо.

Обстеження таких автомобілів виявило появу втомних тріщин різних за виглядом та напрямом розповсюдження в зоні встановлення додаткового обладнання. На подібних автомобілях без додаткового обладнання дефекти виникають значно рідше.

За статистичними даними технічного огляду автомобілів [66] визначено основні зони пошкоджень рам тріщинами:

- 1 – зона поблизу кріплення силового агрегату;
- 2 – зона у місці встановлення упорів та підсилень гідроманіпуляторів;
- 3 – зона зварних швів приварювання елементів рам або попередніх ремонтів;
- 4 – зони кріплення елементів підвіски мобільних машин;
- 5 – зони вм'ятин і прогинів, що утворюються в результаті стороннього механічного впливу чи перевантажень;
- 6 – зони отворів під заклепки та болти, які є концентраторами напружень.



Експлуатація засобів транспорту з тріщинами не допускається.

1. Втомні тріщини у навантажених елементах металоконструкції розвиваються хаотично, що не корелює з напрямками дії основних сил та моментів.

2. Форма вузлів мікротріщин, в яких зароджуються та розвиваються тріщини, подібна дислокаційним картинам (хмари дислокацій).

3. Хмару дислокацій у твердих матеріалах можна ідентифікувати з грозовою, а механізм релаксації енергії внутрішніх напружень шляхом виникнення тріщини відповідає механізму зародження та розвитку блискавки. У обох випадках енергія стікає до зон з найвищою провідністю по найкоротшому шляху. У твердих матеріалах це локальні ділянки з мінімальною тріщиностійкістю. За законами термодинаміки робота по утворенню тріщини на таких локальних ділянках забезпечує зменшення внутрішньої вільної енергії на максимальну величину. Це відповідає ділянкам (кристалітам, структурним складовим) з найвищою твердістю, які і мають найвищу внутрішню енергію.

4. Для забезпечення високої тріщиностійкості та довговічності металоконструкцій необхідно використовувати або створювати матеріали з макроструктурою, яка має спеціальні структурні складові, що можуть виконувати функції каналів для відведення та релаксації накопиченої внутрішньої енергії або передачі підведених потоків. Таку макроструктуру можна створити під час виготовлення або шляхом відповідної обробки (наприклад, термообробки).

5. Об'ємні каркасно-оболонкові металоконструкції в основному під час експлуатації пошкоджуються корозією. Відносно невисокий відсоток пошкоджень тріщинами пояснюється тим, що навантаження рівномірно розподілені обшивкою, яка приварена до металоконструкції.

6. Особливу увагу у подальших дослідженнях слід приділити таким деталям металоконструкції, які несуть навантаження, що нерівномірно розподілені по її ділянках, мають статичні та динамічні складові і можуть змінювати свій знак. Сюди відносяться балки рам мобільних машин, що працюють на згин та крутіння.



## 2 НАПРУЖЕННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ В ЕЛЕМЕНТАХ РАМ ТА ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ

### 2.1 Підходи до моделювання рам транспортних машин та навантажень на них

Моделювання рами автомобіля, як тонкостінної оболонкової конструкції, є прикладом ефективного впровадження МСЕ в розрахункову практику. Однак, завдання аналізу оболонкових конструкцій є одним з найбільш складних класів задач механіки деформування і МСЕ. Якісні алгоритми, формалізація і відносна простота розрахунків тонкостінних оболонкових конструкцій не позбавляє від складності отримання достовірних результатів.

В даний час значний розвиток фундаментальних питань МСЕ і зростання обчислювальних можливостей ЕОМ привели до появи комерційних програмних комплексів, що реалізують МСЕ. При цьому, можливості сучасних ЕОМ дозволяють вирішувати завдання дуже великої розмірності (понад 500 тис. невідомих) [40–42].

Один із таких комплексів використано авторами [42] для оцінки НДС автомобіля КамАЗ-5410. Зазначений комплекс автори використали для визначення розподілу напружень, що виникають в окремих елементах конструкції і деформацій рами автомобіля, в умовах навантажень, що діють за описаною ними схемою (рис. 2.1).

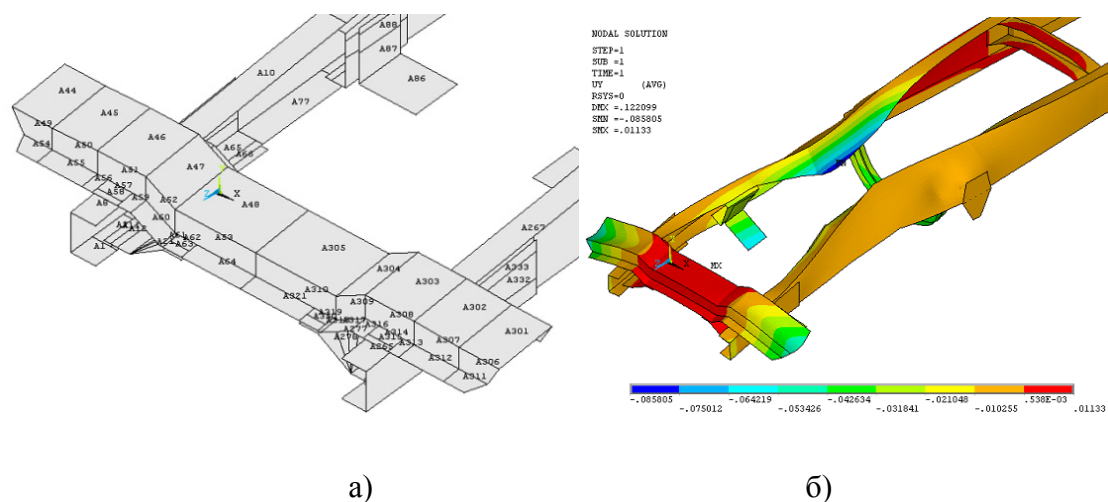


Рисунок 2.1 – Фрагмент моделі рами автомобіля КамАЗ-5410 [42]:  
а) набір складових площин; б) ізополя переміщень в поперечному напрямку

Однак, отримані авторами результати з найбільших переміщень компонентів рами від максимального завантаження, яке за їх підрахунками склало 0,085...0,09 мм, ставлять під сумнів коректність моделі, оскільки суперечать даним інших авторів. Припущення про відсутність радіусів заокруглень на спряженнях між полицями профілю лонжеронів вносить значні похибки.

Актуальними є питання розробки конструкцій несучих систем автомобілів з позицій мінімальної металоємності і раціонального використання характеристик міцності матеріалу елементів рами та її складальних одиниць. Щоб забезпечити достатній ресурс металоконструкції несучої системи, зокрема рами, максимально знизивши її металоємність без шкоди для довготривалої міцності, конструктори використовують розрахункові схеми та методи з високим ступенем деталізації та врахуванням основних особливостей експлуатації [69]. Для проведення розрахунків використовують експериментальні методи визначення реального напруженого стану в окремих точках металоконструкції рами. Так, у роботі [69] дані про напружений стан металоконструкції отримували за допомогою системи первинних перетворювачів (датчиків), що відображають реальну картину деформацій і напружень під час експлуатації рами напівпричепа (рис. 2.2).

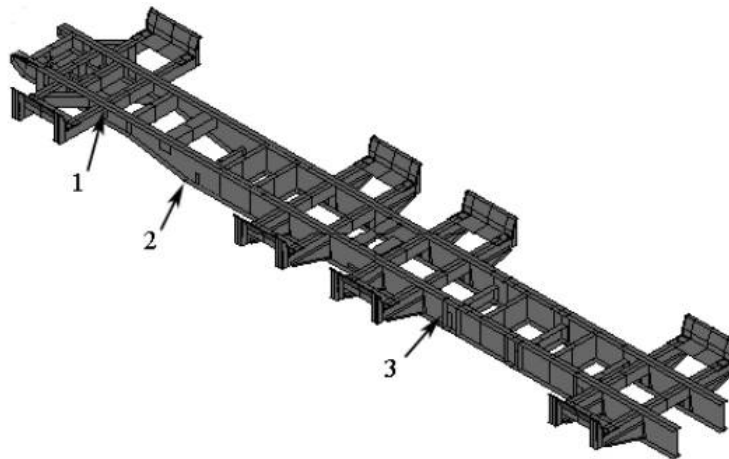


Рисунок 2.2 – Рама напівпричепа та схема встановлення датчиків

Предметом досліджень обрано двовісний напівпричіп-платформа, призначений для перевезення одного 40-футового або двох 20-футових

контейнерів типу 1AA і 1CC або одного 20-футового контейнера (повною масою 30 тонн), територією порту з сідельними тягачами: Терберг, Оттава, Мафі, МАЗ та ін. На підставі багаторічного досвіду експлуатації рами напівпричепа, автори виявили найбільш небезпечні зони (поз. 1–3, на рис. 2.2), на яких були наклеєні розетки первинних перетворювачів.

Проте автором [69] не взяті до уваги деякі моменти (напруження і деформації різні по всьому перерізі), які, на нашу думку, повинні враховуватись в дослідженнях такого плану.

Всього досліджували три зони: стінка поперечини в місці примикання до лонжерона; нижня полиця лонжерона, де виникають максимальні напруження; стінка лонжерона в місці кріплення задньої підвіски. У табл. 2.1 представлені результати кінцево-елементного аналізу та експерименту для повного циклу роботи рами: під час навантаження, транспортування і зняття контейнера.

Таблиця 2.1 – Еквівалентні напруження у зонах рами [69]

Елементи циклу роботи рами	Еквівалентні напруження в зонах, МПа		
	T.1	T.2	T.3
Початок завантаження	0,4	3	2,3
удар	6,1	20,2	11,3
кінець завантаження	5,8	18	8
старт	5	21,8	7,8
Правий поворот на 180°	3	14,5	4,6
зупинка	4,3	16,3	6
старт	3,5	21,1	9,7
Правий поворот на 180°	5	12,8	2,7
лівий поворот на 180°	4,1	23,2	12,7
лівий поворот на 180°	5	22,4	12,9
зупинка	5,6	18	10
Зняття контейнера	0,5	1	3

Отримані дані не дають повної картини напруженого стану системи, проте дають уявлення про рівень напружень у досліджуваних зонах і можуть використовуватись під час комп'ютерного моделювання та для ідентифікації моделей.

## 2.2 Алгоритм моделювання ремонту рами зварюванням та реалізація програми на ЕОМ

В загальному, комп'ютерне моделювання окремих операцій, що супроводжуються виділенням тепла (зварювання, паяння, тощо), доцільно здійснювати в такій послідовності:

- будуємо 3-D модель деталі;
- задаємо, у відповідності до робочого креслення, необхідні фізико-механічні властивості матеріалу;
- зазначаємо ступені вільності та розташування деталі в просторі;
- генеруємо кінцево-елементний аналог деталі;
- задаємо навантаження, що діють на деталь під час проведення операції, та час їх дії тощо;
- проводимо розрахунок результуючих величин (температура, деформації, напруження тощо) із наступним виводом отриманих даних у вигляді графіків, таблиць, полів та інше.

Створена модель записується у пам'яті комп'ютера у вигляді файлу.

Розглянемо більш детально моделювання такої операції технологічного процесу як приварювання накладок по обидві сторони лонжерона рами вантажного автомобіля.

Для спрощення процесу моделювання та зменшення часу розрахунку з метою визначення температурних полів, оптимальних схем та режимів проведення зварювання, що спричиняють найменші втрати запасу міцності основного металу від впливу температурних полів, а отже, підвищують міцність усієї конструкції, використовуємо деталь-представник, що складається із основи та двох пластин. Першим етапом є створення 3-D моделі деталі. Для її побудови можна використати як модуль самих програм кінцево-елементного аналізу, так і імпортувати попередньо створену модель із переважної більшості САД-систем, зокрема КОМПАС-3D, AUTOCAD або SolidWorks. Для цього модель необхідно зберегти у одному із форматів, який розпізнає програма кінцево-елементного аналізу, наприклад igs, sat чи x\_t. Імпортованій моделі автоматично присвоюються стандартні фізико-хімічні властивості, тому на цьому етапі необхідно корегувати властивості матеріалу деталі, що аналізується, (густина, коефіцієнт теплопровідності тощо), або обрати матеріал із бази даних програми із наперед визначеними властивостями. Також визначаються його основні характеристики (ізотропність тощо) [118].

Після створення твердотільної моделі генерується її кінцево-елементний аналог, тобто сітка вузлів та елементів. Кількість скінченних елементів, на які розбивається 3-D аналог деталі, впливає на тривалість розрахунків програми, і, найголовніше, на точність отриманих результатів. Більш детальне розбиття деталі, тобто більша кількість скінченних елементів, підвищує точність розрахунків, проте значно збільшує час їх проведення та об'єм файлів. Так, при кількості скінченних елементів у деталі в декілька сотень тисяч (200000...300000), об'єм файлу створеної моделі може сягати 10...20 Гбайт, а час на його обрахунок сягає декількох годин, а грубе розбиття не дасть чіткого відображення результатів. З метою підвищення точності розрахунків доцільним є більш детальне розбиття на елементи тієї області рами, що безпосередньо межує з місцем прикладання навантаження, в нашому випадку це зварний шов (рис. 2.3).

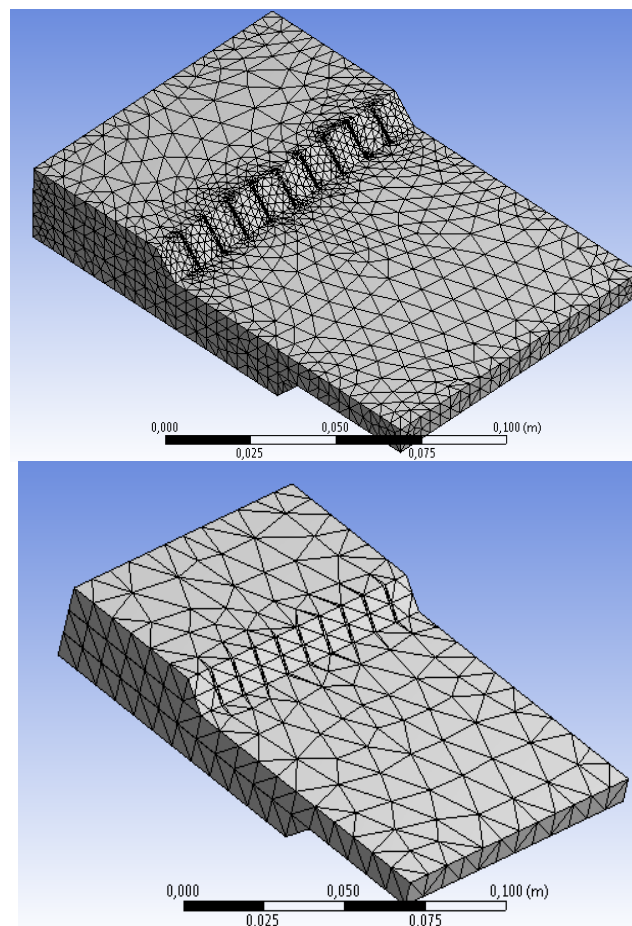


Рисунок 2.3 – 3D-модель ділянки рами з сіткою скінченних елементів

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Туревский И. С. Теория автомобиля : учеб. пособие / И. С. Туревский. – М. : Высш. шк., 2005. – 240 с.
2. Гельфгат Д. Б. Рама грузовых автомобилей / Д. Б. Гельфгат, В. А. Ошноков. – К. : Машгиз, 1959. – 234 с.
3. КрАЗ. Люди. Завод. Автомобили. [Электронный ресурс]. 2006. – Режим доступа: [http://www.dymz.ru/817-napryazheniya\\_v\\_lonzheronach.html](http://www.dymz.ru/817-napryazheniya_v_lonzheronach.html).
4. Прокат для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности ГОСТ Р 52927–2008. [Утв. и введ. в действие от 19 июня 2008.] – М. : Ростехрегулирование, 2009. – IV, 231 с.
5. Волченко В. Н. Сварка и свариваемые материалы : справочник : в 3 т. / В. Н. Волченко, Э. Л. Макаров, В. В. Шип ; общ. ред. Волченко В. Н. – М. : Металлургия, 1991. – Т. 1. – 526 с.
6. Справочник технолога авторемонтного производства / под ред. Г. А. Малышева. – М. : Транспорт, 1977. – 432 с.
7. Биргер И. А. Сопротивление материалов : учебное пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М. : Наука, 1986. – 560 с.
8. Биргер И. А. Прочность, устойчивость, колебания : в 3 т. / под ред. И. А. Биргера. – М. : Машиностроение, 1968. – Т. 1. – 832 с.
9. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни / В. З. Власов. – М. : Физматгиз, 1959. – 200 с.
10. Горбунов Б. Н. Теория рам из тонкостенных стержней / Б. Н. Горбунов, А. И. Стрельбицкая. – М. : Гостехиздат, 1948. – 250 с.
11. Проскураков В. Б. Еще один метод расчета автомобильных рам на кручение / В. Б. Проскураков, Г. Е. Павлова // Автомобильная промышленность. – 1966. – № 5. – С. 25–28.
12. Garret T. K. Automobile dynamic loads / T. K. Garret // Automobile engineer. – 1953. – V. 43, № 563. – P. 60–4.
13. Бычков Д. В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций / Д. В. Бычков. – М. : Стройиздат, 1962. – 230 с.
14. Апанович Ю. Н. Автоматизированный расчет и доводка конструкций автомобильных рам / Ю. Н. Апанович // III Всесоюзное научно-техническое совещание «Динамика и прочность автомобиля» 22–25 ноября 1988 г. : тезисы докладов. – М. : Типография НАМИ, 1988. – С. 28



15. Beermann H. J. Static analysis of commercial vehicle frames: a hybrid finite element and analytical – method / H. J. Beermann // International Journal of Vehicle Design. – 1984. – V.5, № 1 – 2. – P. 26–52.

16. Beermann H. J. Torsion von Nutzfahrzeugrahmen mit offenen und geschlossenen Querschnittsprofilen / H. J. Beermann // Automobiltechnische Zeitschrift. – 1982. – V. 82, № 9. – P. 459–464.

17. Beermann H. J. Wolbbehinderung in Knoten von Fahrzeugrahmen / H. J. Beermann // Leichtbau der Verkehrsfahrzeuge. – 1977. – S. 1–6.

18. Oehlschlaeger H. Nachgiebige Knoten bei der Torsionsberechnung von Nutzfahrzeugrahmen aus offenen Profilen / H. Oehlschlaeger // Automobiltechnische Zeitschrift. – 1986. – V.86, № 3. – P. 105 – 108.

19. Oehlschlaeger H. Berücksichtigung von Quertrager – Aussparungen bei der Berechnung von Nutzfahrzeugrahmen / H. Oehlschlaeger // Leichtbau der Verkehrsfahrzeuge. – 1980. – V. 4, № 6. – P. 74–84.

20. Голованов А. И. Расчет автомобильных рам с учетом податливости узлов / А. И. Голованов, В. В. Нехотьев // Исследования по теории пластин и оболочек. – Казань : Казан. ун-т. – 1989. – Вып. 21. – С. 67–72.

21. Барун В. Н. Снижение металлоемкости несущей системы автомобиля – самосвала КАМАЗ / В. Н. Барун, В. Н. Белокуров, П. Д. Павленко // Автомобильная промышленность. – 1983. – № 9. – С. 12–14.

22. Белокуров В. Н. Выбор схемы установки грузовой платформы на раме самосвала / В. Н. Белокуров // Второе Всесоюзное научно-техническое совещание «Динамика и прочность автомобиля» 1–3 октября 1986 г. : тезисы докладов. – М. : НАМИ, 1986. – С. 28.

23. Белокуров В. Н. Пути снижения металлоемкости рам грузовых автомобилей / В. Н. Белокуров // Автомобильная промышленность. – 1982. – № 10. – С. 15–18.

24. Белокуров В. Н. Обработка и экспресс-анализ результатов прочностных испытаний автомобилей с использованием микро ЭВМ / В. Н. Белокуров, Г. А. Самойлов, А. В. Рубаненко // Автомобильная промышленность. – 1983. – № 3. – С. 15–16.

25. Захаров А. А. Строительная механика и расчет сооружений / А. А. Захаров // – Автомобильная промышленность. – 1982. – № 5. – С. 26–29.

26. Захаров А. А. Расчет системы рама платформа автомобилей – самосвалов на изгиб / А. А. Захаров // Автомобильная промышленность. – 1977. – № 2. – С. 18–33.



27. Захаров А. А. Использование метода моделирования связей при расчете автомобильных рам / А. А. Захаров, В. Н. Белокуров, М. Н. Закс // Автомобильная промышленность. – 1979. – № 11. – С. 8–12.

28. Белокуров В. Н. Регулирование крутильной жесткости рам автомобиля / В. Н. Белокуров, М. Н. Закс // Автомобильная промышленность. – 1972. – № 4. – С. 19–22.

29. Cooke C. J. Vehicle structural analysis / C. J. Cooke // Paper in the Seminar at the Inst. Mech. Engr. : Works for Rolls Roys. – 1968. – May 9

30. Courant R. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations / R. Courant // Bulletin of the American Mathematical Society. – 1943. – V. 49, № 5. – P.1–23.

31. Argyris J. H. Energy and structural analysis: Part I. General theory / J. H. Argyris // Aircraft engineering. – 1954. – V. 26, October. – P. 347–356; November. – P. 383–387, 394; 1955. – V. 27, February. – P. 42–58; March. – P. 80–94; April. – P. 125–134; May. – P. 145–158.

32. Argyris J. H. Energy theorems and structural analysis: Part II. Application to thermal stress analysis and to upper and lower limits of Saint-Venant torsion constant / J. H. Argyris, S. Kelsey // Aircraft Engineering. – 1954. – V. 26. – December. – P. 410–422.

33. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 541 с.

34. Галлагер Р. Метод конечных элементов: Основы. / Р. Галлагер – М. : Мир, 1984. – 428 с.

35. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 392 с.

36. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. – М. : Стройиздат, 1982. – 448 с.

37. Нории Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Нории, Ж. де Фриз. – М. : Мир, 1987. – 304 с

38. Васидзу К. Вариационные принципы в теории упругости и пластичности / К. Васидзу. – М. : Мир, 1987. – 560 с.

39. Альдайуб Зияд. Разработка методики создания рам грузовых автомобилей минимальной массы, отвечающих требованиям по ресурсу, на стадии проектирования : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Альдайуб Зияд. – М., 2006. – 18 с.

39. Дащенко А. Ф. Анализ напряженно-деформированного состояния рамы автомобильного полуприцепа в программе ANSYS / А. Ф. Дащенко, Н. Г. Сурьянинов, Д. В. Лазарева // Вестник Харьков-

ського національного автомобільно-дорожного університета. – 2005. – № 29. – С. 20–30.

40. Белокуров В. Н. Пути снижения металлоемкости рам грузовых автомобилей / В. Н. Белокуров // Автомобильная промышленность. – 1982. – № 10. – С. 15–18.

41. Савуляк В. І. Звіт по темі 12-352 «Матеріалознавчі аспекти відновлення та зміцнення несучих металоконструкцій шляхом приварювання додаткових елементів із спеціальним профілем та властивостями». (номер державної реєстрації 0113U003136).

42. Кравченко А. П. Научные основы управления эффективностью эксплуатации автомобильных поездов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.20 / А. П. Кравченко ; Национальный ун-т им. Владимира Даля. – Х. : ХНАДУ, 2006. – 480 с.

43. Розин Л. А. Вариационные постановки задач для упругих систем / Л. А. Розин. – Л. : ЛГУ, 1978. – 224 с.

44. Лукин П. П. Конструирование и расчет автомобиля / П. П. Лукин, Г. А. Гаспарянц, В. Ф. Родионов. – М. : Машиностроение, 1984. – 376 с.

45. Афанасьев Н. Н. Статистическая теория усталости металлов / Н. Н. Афанасьев. – К. : АН УССР, 1953. – С. 164–165.

46. Денисенко М. І. Втомні пошкодження поверхонь деталей регулюючих робочих органів сільськогосподарської техніки / М. І. Денисенко // Науковий вісник НУБіП України. – 2010. – Вип. 144(1). – С. 35–41.

47. Бакалець Д. В. Підвищення надійності та відновлення металоконструкцій транспортних та сільськогосподарських машин / Д. В. Бакалець, В. І. Савуляк, // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія Технічні науки. – 2012. – Випуск 11(66). – Т. 2. – С. 302–306.

48. Бакалець Д. В. Забезпечення міцності рамних конструкцій транспортних та технологічних машин приварюванням накладок для зміцнення / Д. В. Бакалець, В. І. Савуляк // Збірник тез доповідей VI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та аспірантів «Підвищення надійності машин і обладнання». – Кіровоград : КНТУ, 2012. – С. 16–17.

49. Дацишин О. П. Квазістатичний розвиток крайової тріщини при несамозрівноваженому навантаженні на її берегах / О. П. Дацишин, Г. П. Марченко // Физ.-хим. механика материалов. – 1991. – № 4. – С. 53–59.

50. Андрейкив А. Е. Усталостное разрушение и долговечность конструкций / А. Е. Андрейкив, А. В. Дарчук. – К. : Наук. думка, 1992. – 400 с.

51. Кравчук А. В. Особенности развития усталостных трещин в поверхностно-упрочненных деталях машин / А. В. Кравчук, А. Ф. Дашенко // Труды Одес. политехн. ун-та. – 1997. – № 1. – С. 33–34.

52. Колмогоров В. Л. Напряжение, деформация, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1970. – 312 с.

53. Саврук М. П. Механика разрушения и прочность материалов. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами : справочное пособие в 4-х т. / М. П. Саврук. – К. : Наук, думка, 1988. – Т. 2. – 620 с.

54. Панасюк В. В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках / В. В. Панасюк, М. П. Саврук, А. П. Дацишин. – К. : Наукова думка, 1976. – 443 с.

55. Карпенко Г. В. Влияние среды на прочность и долговечность материалов / Г. В. Карпенко. – К. : Наукова думка, 1976. – 125 с.

56. Пачурин Г. В. Закономерности сопротивления усталостному разрушению на воздухе и в коррозионной среде деформационно-упрочненных металлических материалов и повышение на их основе долговечности изделий: дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.01 / Г. В. Пачурин // Нижегородский гос. техн. ун-т. – Н. : НГТУ, 2003. – 329 с.

57. Бідун О. Дефектування і втомлювальні відмови елементів стрілочних переводів. / О. Бідун // Транспортні системи і технології : збірник наукових праць ДЕТУТ. – 2008. – № 13. – С. 25–28.

58. Гурман В. С. Ремонт автомобильных рам. / В. С. Гурман. – М. : Транспорт, 1967. – 100 с.

59. Грабар І. Г. Руйнування рамних конструкцій транспортних засобів в умовах експлуатації / І. Г. Грабар, В. Є. Титаренко // Вісник ЖДТУ. – 2007. – № 3 – С. 55–58.

60. Denisenko N. Подовження ресурсу деталей та вузлів машини з втомними пошкодженнями / N. Denisenko, V. Voityuk // Motrol. – 2008. – № 10(B). – С. 193–200.

61. Титаренко В. Є. Стенд для динамічних випробувань натурних елементів рами напівпричепа / В. Є. Титаренко // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2005. – № 3 (34). – С. 15–18.

62. Титаренко В. Е. Напряженно-деформированное состояние и долговечность рам полуприцепов : дис. ... канд. техн. наук : 01.02.04 / В. Е. Титаренко. – Тернополь, 2006.

63. Дурнопьянов И. И. Экспериментальные исследования рамы полуприцепа [Электронный ресурс]. / И. И. Дурнопьянов // Технические науки. Транспорт. Одесский национальный политехнический университет. – Режим доступа: [http://www.rusnauka.com/29\\_DWS\\_2012/Tecnic/4\\_120752.doc.htm](http://www.rusnauka.com/29_DWS_2012/Tecnic/4_120752.doc.htm).

64. Кобрин М. М. Классификация и анализ усталостных разрушений рам грузовых автомобилей, используемых в сельском хозяйстве / М. М. Кобрин. – М. : Труды ГОСНИТИ, 1964. – 112 с.

65. Кобрин М. М. Стендовые испытания рам грузовых автомобилей / М. М. Кобрин, Л. М. Мельчук. – М. : Автомобильная промышленность, 1963. – 74 с.

66. Гурман В. С. Повысить долговечность автомобильных рам / В. С. Гурман, М. Кобрин, Л. М. Мельчук. – М. : Транспорт, 1964. – 94 с.

67. Доронин С. В. Оценка и регулирование свойств рам карьерных самосвалов с трещиноподобными дефектами / С. В. Доронин, Т. В. Донцова // Журнал сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2012. – № 6. – С. 703–714.

68. Доронин С. В. Проектные оценки долговечности и живучести рам карьерных самосвалов / С. В. Доронин, Т. В. Донцова // Журнал сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2012. – № 7. – С. 760–765

69. Савуляк В. В. Пластичне деформування тонколистового матеріалу в умовах значних локалізацій деформацій та напружень. Монографія / В. В. Савуляк, І. О. Сивак, В. І. Савуляк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 150 с.

70. Бабкин В. И. Оценка циклической трещиностойкости сварных подкрановых балок тяжелого режима работы : дис. ... канд. техн. наук / В. И. Бабкин. – М., 1988. – 189 с.

71. Концепция остановки трещины и ее применение / Дж. Хан, А. Розенфилд, К. Маршалл, Р. Хоагленд, П. Гелен, М. Каннинен // Механика разрушения. Быстрое разрушение, остановка трещин : сб. статей. – М. : Мир, 1981. – С. 222–253.

72. Кравчук А. В. Особенности развития усталостных трещин в поверхностно-упрочненных деталях машин / А. В. Кравчук,

А. Ф. Дашенко // Труды Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 1997. – Вып. 1. – С. 33–34.

73. Еремин К. И. Остаточный ресурс циклически нагруженных металлоконструкций с трещиноподобными дефектами : дисс. ... д-ра техн. наук. – М., 1996. – 418 с.

74. Меннанов Э. М. НДС сварных стыков строительных конструкций сейсмостойких зданий / Э. М. Меннанов // Строительство и технологическая безопасность. – 2013. – № 45. – С. 34–38.

75. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках. ИЭС им. Е. О. Патона / под ред. В. И. Труфякова. – Киев : Наук, думка, 1990. – 256 с.

76. Механические свойства материалов при повышенных температурах / пер. с англ. под ред. Гецова Л. Б. – М. : Metallurgiya, 1965. – 294 с.

77. Патент на корисну модель 31166 Україна, МПК В23К35/365. Плавкий біметалевий електрод для зварювання та наплавлення / Савуляк В. І, Заболотний С. А. – № u200714146 ; заявл. 17.12.2007 ; опубл. 25.03.2008, Бюл. № 6. – 4 с.

78. Гавриш П. А. Термодинамические особенности взаимодействия меди и железа в сварочной ванне / П. А. Гавриш, М. А. Турчанин // Вестник ДГМА. – 2006. – № 2(4). – С. 75–78.

79. Аснис Е. А. О механизме образования трещин при сварке и наплавке меди на сталь / Е. А. Аснис, В. М. Прохоренко, Л. С. Швиндлерман // Сварочное производство. – 1965. – № 11. – С. 8–9.

80. Сварка меди со сталью в среде углекислого газа / Н. Г. Лосицкий, В. Я. Глушко, А. Е. Митус и др. // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1973. – № 6. – С. 26–28.

81. Шутов Б. А. Об оптимальном составе металла шва при сварке плавлением меди с низкоуглеродистой сталью / Б. А. Шутов, А. А. Ерохин // Автоматическая сварка. – 1970. – № 11. – С. 17–19.

81. Савуляк В. В. Вибір параметрів покриття для забезпечення мінімальних радіусів згину / В. В. Савуляк, В. О. Ницимайло // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 4. – С. 168–171.

82. Сварка разнородных металлов и сплавов / В. Р. Рябов, Д. М. Рабкин, Р. С. Курочко, Л. Г. Стрижевская. – М. : Машиностроение, 1984.

83. Аснис Е. А. Особенности наплавки меди на хромоникелевые сплавы / Е. А. Аснис, В. Н. Замков // Сварочное производство. – 1961. – № 7. – С. 20–22.

84. Вайнерман А. Е. О влиянии проникновения медного сплава на свойства соединений, получаемых наплавкой сплавов на сталь / А. Е. Вайнерман // Наплавка металлов. – Л. : ЛДНТП, 1970, ч. II, С. 25–35.
85. Грудзинский Б. В. О взаимодействии расплавленной меди со сталями при наплавке и сварке / Б. В. Грудзинский, И. А. Шлямнева, Г. А. Степанов // Сварочное производство. – 1970. – № 12. – С. 10–12.
86. Рабкин Д. М. Сварка разнородных металлов / Д. М. Рабкин, В. Р. Рябов, С. М. Гуревич. – Киев : Техника, 1976. – 208 с.
87. Джевага И. И. Исследование влияния режимов наплавки и состава медных сплавов на механические свойства сталей марок Ст3, 20Х, 40Х и 40ХН / И. И. Джевага, Г. М. Иващенко // Сварка цветных металлов. – Л. : ЛДНТП, 1969. – С. 105–114.
88. Сютьев А. Н. Плазменная наплавка бронз на изделия цилиндрической формы / А. Н. Сютьев, А. Е. Вайнерман. – Л. : ЛДНТП, 1970. – 20 с.
89. Чернов В. В. Особенности сварки трением меди и ее сплавов со сталями / В. В. Чернов, Г. Г. Утлинский, Н. И. Щестопалов // Вопросы механизации и автоматизации сварочного производства. – Тула : ТПИ, 1977. – С. 79–85.
90. Строение и свойства биметалла сталь + медь в широком интервале температур / А. Н. Ростовцев, В. М. Самойлов, И. П. Кошкин и др. // Структура и свойства ионных и металлических кристаллов : тр. Новосибирского педагогического института. – Новосибирск, 1976. – № 126. – С. 115–127.
91. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом / А. А. Дерибас. – Новосибирск : Наука. – 1972. – 188 с.
92. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка материалов. / Н. Ф. Казаков. – М. : Машиностроение, 1976. – 312 с.
93. Абрамович В. Р. Склонность коррозионно-стойкой стали типа 18-8 к растрескиванию при автоматической наплавке на нее меди и сплавов на медной основе в аргоне / В. Р. Абрамович, В. А. Андроник // Сварочное производство. – 1978. – № 9. – С. 11–13.
94. Абрамович В. Р. Цеклическая прочность сварных соединений меди и сплава МНЖ 5-1 со сталью 08Х18Н10Т / В. Р. Абрамович, В. Н. Захаров // Сварочное производство. – 1979. – № 3. – С. 21–22.
95. Баранов А. В. Создание присадочных материалов и технологических процессов сварки и наплавки медных сплавов и разнородных металлов / А. В. Баранов, А. Е. Вайнерман, И. В. Чумакова // Вопросы материаловедения. – 2005. – № 2(42). – С. 148–162.



96. Чигарев В. В. Проблемы повышения качества сварки меди со сталью / В. В. Чигарев, В. А. Ключев, П. А. Гавриш // Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития : материалы I международной науч.-техн. конф., 6-9 октября, 2009 г. / под общей редакцией Н. А. Макаренко. – Краматорск : ДГМА. – 2009. – С. 34.

97. Кряжков В. М. Надежность и качество сельскохозяйственной техники / В. М. Кряжков. – М. : Агропромиздат, 1989. – 335 с.

98. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя в 3-х томах / В. И. Анурьев. – 8-е изд. – М. : Машиностроение, 2001. – Т. 1. – 920с.

99. Харламов Ю. А. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин : учеб. пособие в 2 т. / Ю. А. Харламов, Н. А. Будагьянц. – Луганск : Восточноукраинский нац. ун-та им. В. Даля, 2003. – Т. 1. – 496 с. – 2003. – Т. 2. – 480 с.

100. Волков С. И. Характер и причины технологических дефектов капитально отремонтированных машин / С. И. Волков // Восстановление деталей, ремонт и диагностика машин. – Калуга : Малоярославецкий филиал ГОСНИТИ. – 1977. – С. 292–297.

101. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И. Н. Ермолов. – М. : Машиностроение, 1981. – 240 с.

102. Ергучев Л. А. Магнитные методы и средства неразрушающего контроля деталей железнодорожного подвижного состава / Л. А. Ергучев. – Гомель: БелГУТ, 2005. – 90 с.

103. Кузьменко А. Г. Методи розрахунків і випробувань на зношування та надійність / А. Г. Кузьменко. – Хмельницький, 2002. – 151 с.

104. Бакалець Д. В. Забезпечення міцності рамних конструкцій транспортних та технологічних машин приварюванням накладок для зміцнення / Д. В. Бакалець, В.І. Савуляк // VI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів та аспірантів «Підвищення надійності машин і обладнання» : збірник тез доповідей. – Кіровоград : КНТУ, 2012. – С. 16–17.

105. Куплун А. Б. ANSYS в руках инженера / А. Б. Куплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

106. Савуляк В. І. Мінімізація деформацій та теплових впливів у рамних конструкціях під час приварювання накладок для зміцнення / В. І. Савуляк, С. А. Заболотний, Д. В. Бакалець// Наукові праці ВНТУ. – 2012. – № 4 – С. 101–106.



107. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.
108. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
109. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машиностроение, 1951. – 296 с.
110. Кархин В. А. Тепловые основы сварки / В. А. Кархин. – Л. : Изд-во Ленинград. гос. ин-та, 1990. – 100 с.
111. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / А. Я. Недосека. – К. : ИНДПРОМ, 2001. – 815 с.
112. Грабар І. Г. Руйнування рамних конструкцій транспортних засобів в умовах експлуатації / І. Г. Грабар, В. Є. Титаренко // Вісник ЖДТУ. – 2007. – № 3 – С. 55–58.
113. Властивості зварних з'єднань металоконструкцій після зміцнюючої деформаційно-термічної обробки / А. П. Штихно, В. І. Алімов, О. О. Полянський, Д. В. Васютченко // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – № 1 (16). – т. 2. – С. 57–61.
114. Савуляк В. І. Вплив заліковування тріщин мідними сплавами на міцність сталевих конструкцій / В. І. Савуляк, Д. В. Бакалець // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 4. – С. 172–175.
115. Василик А. В. Теплові розрахунки при зварюванні / А. В. Василик, Я. А. Дрогомирецький, Я. А. Криль. – Івано-Франківськ : Факел, 2004. – 209 с.
116. Чегарев А. В. ANSYS для инженеров / А. В. Чегарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М. : Машиностроение, 2004. – 512 с.
117. Савуляк В. І. Температурні поля та деформації під час відновлення деталей транспортної техніки / В. І. Савуляк, С. А. Заболотний, В. Й. Шенфельд // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2009. – № 11(141). – С. 48–52.
118. Сідашенко О. І. Ремонт машин / О. І. Сідашенко, О. А. Науменко, А. Я. Поліський. – К. : Урожай, 1996. – 218 с.
119. Капитальный ремонт автомобилей : справочник / Л. В. Дехтеринский, К. Х. Акмаев, В. П. Апсин [и др.] ; под ред. Р. Е. Есенберлина. – М. : Транспорт, 1989. – 335 с.
120. Воловик Е. Л. Справочник по восстановлению деталей / Е. Л. Воловик. – М. : Колос, 1981. – 351 с.

121. Ясній П. В. Пластично деформовані матеріали: втома і тріщинотривкість / П. В. Ясній. – Л. : Світ, 1998. – 292 с.

122. Четвертко А. И. Установки и станки для электродуговой сварки и наплавки / А. И. Четвертко, В. А. Тимченко. – К. : Техніка, 1974. – 240с.

123. Патент на корисну модель 83355 Україна, МПК В23Р 6/04 (2006.01), В23К 1/00. Спосіб ремонту поверхонь рам транспортної техніки та технологічних машин, що ушкоджені тріщинами / Савуляк В. І, Заболотний С. А, Бакалець Д. В. – № и 201300304 ; заявл. 09.01.2013 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17. – 3с.

124. Денель А. К. Дефектоскопия металлов / А. К. Денель. – М. : Металлургия, 1972. – 304 с.

125. Філіпченко А. В. Застосування комбінованого зварювання для забезпечення міцності та надійності рамних конструкцій транспортних та технологічних машин / А. В. Філіпченко, Д. В. Бакалець, В. І. Савуляк // VII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів та аспірантів «Підвищення надійності машин і обладнання» : збірник тез доповідей. – Кіровоград : КНТУ, 2013. – С. 26–27.

126. Savulyak V. I. Improvement of strengthening and repair of frame structures welding methods / V. I. Savulyak, S. A. Zabolotniy, D. V. Bakalets // New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies. – Romainia, 2013. – № 20. – S. 189–192.

127. Поступайло О. В. Якісні характеристики зварювання рамно-оболонкових конструкцій / О. В. Поступайло, Д. В. Бакалець, В. І. Савуляк // Наукові нотатки : міжвузівський збірник (за галузями знань «машинобудування та металообробка», «інженерна механіка», «металургія та матеріалознавство»). – Луцьк, 2013. – Вип. 41, частина 2. – С. 121–126.

128. ГОСТ 8278-83. Швеллеры стальные гнутые равнополочные. – М. : Издательство стандартов, 1988. – 16 с.

*Наукове електронне видання комбінованого використання.  
Можна використовувати в локальному та мережному режимах*

**Савуляк Валерій Іванович,  
Бакалець Дмитро Віталійович,  
Савуляк Віктор Валерійович**

**РЕМОНТ ТА ЛОКАЛЬНЕ ЗМІЦНЕННЯ РАМ  
ТРАНСПОРТНИХ МАШИН**

Монографія

Редактор Світлана Малішевська

Оригінал-макет підготовлено Валерієм Савуляком

Системні вимоги:

процесор Pentium; 512 Mb RAM;

Windows XP,7,8,10; Acrobat Reader 6.0+.

Один електронний оптичний диск (CD-ROM); Обсяг даних 8,9 Мб.

Наклад 100 (1-й запуск 1–30) прим. Зам. № E2019-07

Видавець та виготовлювач – Вінницький національний технічний університет,

Інформаційний редакційно-видавничий центр.

Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к. 114,

м. Вінниця, 21021, тел.: (0432) 59-85-32, 59-81-59.

**press.vntu.edu.ua**; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.