

# Підвищення довговічності циліндричних деталей колісних візків залізничних вагонів

І.С. Афтаназів<sup>1</sup> • Л.І. Шевчук<sup>1</sup> • О.І. Строган<sup>1</sup> • Л.Р. Струтинська<sup>1</sup> • І.В. Строган<sup>1</sup>

Received: 23 March 2021 / Accepted: 24 May 2021

**Анотація.** Надано опис нової конструкції вібраційної машини для зміцнення поверхневим пластичним деформуванням циліндричних довгомірних деталей, зокрема стабілізаторів колісних візків залізничних вагонів. Окреслено основні конструктивні та технологічні параметри процесу вібраційно-відцентрового зміцнення цих деталей. На циліндричних зразках із сталі 45 експериментально досліджено вплив технологічних параметрів даного зміцнювального процесу на такий основний показник зміцнювальної обробки як глибина зміцнення. Наведено математичні залежності для вибору оптимальних значень конструктивних та технологічних параметрів даної зміцнювальної обробки.

Окреслено перелік довгомірних циліндричних деталей, для яких придатна і ефективна вібраційно-відцентрова зміцнювальна обробка, серед яких торсіонні вали підвіски військових танків, осі коліс залізничного транспорту, бурові та обсадні труби газо- та нафтовидобувних свердловин.

**Ключові слова:** зміцнення, поверхнєве пластичне деформування, сталь, стабілізатор, сталеві кульки, глибина зміцнення, залізничний транспорт.

## Вступ

Відчутним резервом підвищення міцності, надійності та довговічності сталевих деталей є запровадження у технологічний процес їх виготовлення зміцнювальних операцій поверхневим пластичним деформуванням (ППД). Ця операція доволі широко використовується в різноманітних галузях машинобудування і переважно застосовується як засіб підвищення відповідальним деталям здатності надійно протистояти значним експлуатаційним навантаженням. Різноманітні методи поверхневого зміцнення, найвідомішими з яких являються накатування роликком, карбування, вібраційне або дробоструменеве зміцнення, застосовують переважно для оброблення радіусних переходів ступінчастих валів, гільз двигунів внутрішнього згорання, лопаток турбогвинтових авіаційних двигунів тощо [1, 2]. Зміцнення поверхневим пластичним де-

формуванням матеріалу таких деталей не тільки покращує у поверхневих прошарках його структуру металу, а одночасно і сприяє утворенню в поверхневих прошарках стискальних залишкових напружень та формування поверхневого шару металу із підвищеною твердістю [3]. У кінцевому результаті в умовах експлуатації це забезпечує підвищення опору металу відповідальних деталей знакозмінним циклічним навантаженням. Поряд з тим понижуються швидкості росту втомних мікротріщин. У комплексі все це спроможне на 25–30 % підвищити не тільки надійність, а і довговічність деталей, продовжити їх так званий “життєвий цикл”.

Особливою мірою методи поверхневого пластичного деформування ефективні для деталей, що в процесі експлуатації піддаються значним динамічним навантаженням, а також знакозмінному циклічному впливу експлуатаційних навантажень. Саме до когорти таких деталей і належать складові вузли та окремі деталі колісних візків залізничного транспорту. Втома, зношування і корозія – ось основні фактори, що обумовлюють ресурс цих деталей. І до когорти найбільш навантажених тут, поряд із боковими та рамними конструкціями, належить група циліндричних деталей із круглим поперечним перерізом. Як правило це деталі,

✉ І.С. Афтаназів  
ivan.aftanaziv@gmail.com

<sup>1</sup> Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів, Україна

що відносяться до групи довгомірних із незначним поперечним перерізом порівняно із їх довжиною. Така конструктивна будова довгомірних деталей робить їх надзвичайно чутливими до знакозмінних циклічних та ударних навантажень і схильних до утворення на ділянках конструктивних концентратів напружень втомних мікро тріщин. У типових конструкціях колісних візків тягових локомотивів, вантажних та пасажирських вагонів, вантажних залізничних платформ, перш за все, осі колісних пар, а також так звані “тягові повідці”. У типовій моделі колісних візків пасажирських вагонів типу КВЗ-ЦНІИ тягові повідці з’єднують надресорну балку із кожною з боковин колісного візка. Спільно із пружинами ресорного підвішування тягові повідці утримують надресорну балку в стабільному центральному положенні. Схожі функції стабілізації вагонів відносно колісних візків та колійного полотна у підвісці ходової частини трамваїв покладено на так звані “реактивні тяги”. У технічній літературі окрім термінів “тягові повідці”, “реактивні тяги” зустрічається і інші тою чи іншою мірою вдалі назви цих деталей, що призначені для стабілізації просторового розташування вагонів відносно колійного полотна. Тому всі ці назви деталей спільного цільового призначення доречно об’єднати однією назвою, якою користуватимуться і автори цієї статті, а саме “стабілізатор” Стабілізатори поперечних коливань колісних візків залізничних вагонів, виготовляють із конструкційної сталі 35, або сталі 45. Їх загартовують для покращення пружних властивостей. Переважно ці деталі в процесі експлуатації вагонів через нерівності колійного полотна піддаються скручувальним та згинальним багатоцикловим навантаженням. Особливою мірою ці навантаження відчутні при високому ступені зношеності залізничних колій, яка якраз і притаманна переважаючій більшості залізничних шляхів України. За своєю геометричною формою стабілізатори коливань вагонів наближені до форми деталей класу ступінчасті вали і складаються із трьох ділянок. Дві кінцеві циліндричні або різьбові ділянки цих деталей призначені для фіксації стабілізатора різьбовим або клемовим затиском, а середня ділянка це суцільний циліндричний стержень переважно діаметром 50–70 мм, призначений для сприйняття експлуатаційних крутильних та згинальних навантажень. Загальна довжина стабілізатора, залежно від цільового призначення транспортного засобу, знаходиться в межах 550–900 мм, з яких по 70–80 мм припадає на кожную із двох торцевих кріпильних ділянок. Технологічний процес виготовлення стабілізаторів коливань вагонів включає переважно застосування в якості заготовки прокату або литво заготовки, її гаряче кування для формоутворення потовщених кріпильних ділянок та подальше термічне оброблення (загартовування) для надання матеріалу стабілізатора належних міцності та пружності. Як правило, загартовуванню передують механічне оброблення на токарних верстатах, яке забез-

печує формоутворення циліндричних кріпильних ділянок стабілізаторів.

Аналіз умов експлуатації стабілізаторів колісних візків залізничного транспорту відображає, що основними експлуатаційними навантаженнями цих відповідальних за динаміку руху залізничних вагонів деталей є знакозмінні крутильні та згинальні навантаження. Основною причиною їх появи та результатами прояву є поперечні коливання масивних вагонів, обумовлені стикуваннями рельсів та зношеністю колійного полотна залізничних магістралей.

Ударні та знакозмінні крутильні і згинальні навантаження формують в поверхневих прошарках матеріалу стабілізаторів так звані залишкові напруження розтягу, які накопичуючись провокують появу в приповерхневих прошарках металу деталі мікротріщин. Тривала експлуатація таких деталей супроводжується наростанням кількості мікротріщин, а їх розростання і злиття формує так звані втомні мікротріщини. Ну а втомні тріщини та мікротріщини – це зародок розлому товщі металу, який може спровокувати небезпечну для пасажирів та вантажів аварійну ситуацію. Певним чином проблема втомного зношення металу стабілізаторів колісних візків ще і поглиблюється тим, що візуальним оглядом втомні мікротріщини в матеріалі стабілізаторів виявити не можливо.

Тому і підлягають заміні стабілізатори при капітальних ремонтах колісних візків і, як правило, тільки на підставі зовнішнього візуального огляду та оцінки ступеня зношеності матеріалу.

І це поряд з тим, що якісна зміцнювальна обробка робочої циліндричної поверхні стабілізаторів могла б не тільки продовжити відсотків на 25–30 % термін служби нових деталей, а і на 45–50 % відновити моторесурс стабілізаторів на етапі капітального ремонту колісних візків. Із метою покращення експлуатаційних характеристик стабілізаторів, зокрема підвищення їх міцності, надійності та довговічності, у технологічний процес їх виготовлення пропонується як фінішну операцію включити зміцнення зовнішньої циліндричної робочої поверхні поверхневим пластичним деформуванням.

### **Аналіз літературних джерел і постановка проблеми**

Відомо, що методи зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням започаткувались в середині минулого століття саме для підвищення міцнісних характеристик суцільних циліндричних деталей типу вал. На початкових етапах це були операції накатування роликотом радіусних переходів ступінчастих валів, що здійснювались з метою усунення концентраторів напружень на ділянках переходів валів із одного діаметра на інший [4, 5]. У подальшому на заміну статичному методу накатування роликотом

радіусних переходів було створено і успішно запроваджено у виготовлення найрізноманітніших деталей машинобудування динамічні методи поверхневого зміцнення. Найрозповсюдженіші посеред них це карбування, вібраційна та дробоструменева зміцнювальні обробки [5, 6, 7].

Враховуючи, що кінцевою метою даної науково-дослідної роботи є вдосконалення технологічного процесу виготовлення стабілізаторів колісних візків залізничних вагонів, аналіз ефективності зміцнювальних технологій проведено саме із міркувань їх придатності у промислового використанні саме для цих деталей. Із цих міркувань слід відзначити, що для зміцнення радіусних переходів стабілізаторів доволі ефективним може бути застосування у якості зміцнювальної обробки карбування [5]. Володіючи високою ступінню енергії ударної взаємодії інструменту із поверхнею зміцнюваної деталі карбування спроможне якісно проклепати радіусні переходи центральної робочої частини стабілізаторів у їх кріпильні ділянки. Глибина залягання зміцненого прошарку матеріалу на сталевих деталях при цьому може сягати 1–1,5 мм. Однак досвід експлуатації стабілізаторів коливальних залізничних вагонів свідчить, що переважаюча більшість їх руйнувань відбувається не на ділянках розташування радіусних переходів, як це має місце при руйнуванні ступінчастих валів, а на віддаленій на третину загальної довжини циліндричній робочій ділянці [2]. Обумовлено це, очевидно, тим, що основним експлуатаційним навантаженням стабілізаторів, на відміну від навантажень валів, є не крутильні, а згинальні навантаження. Це свідчить, що карбувальне зміцнення стабілізаторів лише на ділянках радіусних переходів у кріпильні частини мало ефективне. Тут доречною є зміцнювальна обробка всієї циліндричної робочої частини стабілізаторів. І карбування в традиційному його використанні тут не придатне через свою низьку продуктивність при обробці протяжних поверхонь. Адже стабілізатори колісних візків підлягають, як правило, заміні при доволі частих ремонтах колісних пар, тобто належать до групи масових деталей. Тому надмірне нарощування тривалості технологічного циклу їх виготовлення тут недопустиме.

Малопродатною для зміцнення поверхні стабілізаторів колісних візків виявляється і доволі розповсюджена дробоструменева зміцнювальна обробка. Проблема у її використанні тут полягає виключно у недостатній енергії ударної взаємодії розігнаних до великих швидкостей дробу чи сталевих кульок із оброблюваною поверхнею. Адже сила удару тут, не зважаючи на високі швидкості деформованих тіл, обмежена їх незначною масою. І як наслідок сталеву загартовану поверхню стабілізаторів дробоструменевою зміцнювальною обробкою можна проклепати на глибину в межах 0,05–0,06 мм. А цього явно недостатньо для відчутного підвищення довговічності цих відповідальних деталей.

Більш перспективною стосовно ефективного поверхневого зміцнення стабілізаторів виглядає віброударна обробка. Тим більше, що тут уже накопичено певний позитивний досвід ефективного зміцнення сталевих циліндричних деталей, у тому числі і довгомірних. Зокрема у Національному університеті “Львівська політехніка” розроблена і випробувана дослідна віброударна установка для поверхневого зміцнення бурових штанг. Метою зміцнення цих довгомірних деталей довжиною 2–2,5 м із шестиграним поперечним перерізом, виготовлених із конструкційної сталі марки “сталь 35”, було підвищення їх опору скручування [7]. Зміцнення бурових штанг проводили в віброударній установці із циліндричним наповненим сталевими загартованими кульками діаметром 11–12 мм контейнером. Забезпечувана глибина зміцнення знаходилась в межах 0,05–0,072 мм. Випробування у виробничих умовах засвідчили спроможність віброударної обробки підвищити на 25–30 % довговічність бурових штанг. Проте процес віброударної обробки виявився не тільки довготривалим у часі, а і надмірно енергозатратним через потребу в забезпеченні основного робочого коливного руху масивного наповненого майже точною деформівних сталевих ударних тіл. Саме це і стає на перешкоді використанню віброударної зміцнювальної обробки як для довгомірних циліндричних деталей типу бурової штанги, так, очевидно, і для можливої зміцнювальної обробки стабілізаторів колісних візків залізничних вагонів чи інших деталей залізничного транспорту.

Постає очевидним, що для сталевих деталей даного класу, коли потреба у зміцненні полягає не лише в обробці обмежених за розміром по довжині ділянок із концентраторами напружень, а всієї протяжної їх робочої циліндричної поверхні, необхідне створення спеціалізованого зміцнювального обладнання оригінальних конструкцій. Зокрема оригінальну конструкцію зміцнювача для обробки зовнішніх циліндричних поверхонь довгомірних деталей створили автори патенту України №51720 [8]. Даний пристрій зорієнтовано на зміцнення циліндричних поверхонь бурових обсадних труб. Основними складовими цього зміцнювача є електропривід, коливна пружна система та прикріплений до неї ударний елемент. В процесі зміцнювальної обробки зміцнювач розташовують на зміцнюваній поверхні деталі, на обмотки котушок електромагнітів приводу подають живильну напругу. При цьому ударна маса співударяється із оброблюваною поверхнею деталі, контактуючи з нею закріпленими в ударній масі деформівними сталевими кулькам. Однак, через надмірні енергетичні втрати на забезпечення резонансних коливних рухів ударної маси коефіцієнт корисної дії електромагнітного приводу тут доволі незначний (в межах 15–20 %). Це і унеможливає використання даного зміцнювального пристрою для такої масової у виробництві деталі як стабілізатор колісного візка залізничних вагонів.

Отже, визначаючи, що поверхневе пластичне деформування як зміцнювальна обробка для стабілізаторів колісних візків залізничних вагонів є ефективним технологічним резервом підвищення їх міцності та довговічності, слід визнати і той незаперечний факт, що на сьогодні відсутні ефективні зміцнювальні пристрої, спроможні ефективно і якісно зміцнити роботу поверхню стабілізаторів. Таким чином, слід визнати, що проблема якісного поверхневого зміцнення ППД сталевих циліндричних протяжних деталей, зокрема і стабілізаторів колісних візків залізничних вагонів, залишається актуальною і у сьогодні.

### Мета і задачі дослідження

Мету даного науково-практичного дослідження слід сформулювати як розробка принципової конструктивної схеми високопродуктивного зміцнювача для поверхневого пластичного деформування робочої циліндричної поверхні стабілізаторів колісних візків залізничних вагонів, а також дослідження динаміки ударного елемента зміцнювача для оптимізації технологічних параметрів зміцнювальної обробки.

Для досягнення окресленої мети були сформульовані задачі дослідження, найвагомішими посеред яких є:

- розробка конструктивної схеми дослідної установки для поверхневого зміцнення робочої циліндричної поверхні стабілізатора колісних візків залізничних вагонів;
- встановлення математичних залежностей для виробу та оптимізації основних конструктивних та технологічних параметрів процесу зміцнення стабілізаторів;
- дослідження впливу основних технологічних параметрів процесу зміцнення стабілізаторів на їх міцнісні характеристики.

### Виклад основного матеріалу дослідження

В основу розробленої конструкції дослідної установки для поверхневого зміцнення циліндричних деталей колісних візків залізничних вагонів покладено створену в НУ “Львівська політехніка” вібраційно-відцентрову зміцнювальну обробку. У її основу покладено ідею застосування у якості основного джерела корисної енергії деформування матеріалу зміцнюваної деталі інерційних сил, що формуються внаслідок планетарного обкочувального руху ударного деформівного тіла завчасно розрахованої маси. У процесі планетарного обкочувального руху масивне деформівне тіло (обкатник) контактує із оброблюваною поверхнею через незначну кількість розташованих вздовж твірної оброблюваної поверхні сталевих загартованих до високої твердості сферичних кульок. Обкочувального планетарного руху масивному

обкатнику надають завдяки вібраціям його привідних елементів. Першими дослідниками, хто успішно реалізував цю ідею, були науковці Ленінградського науково-дослідного підприємства “Механобор”. У створених нами вібраційних конічних дробарках для подрібнення породи було використано масивний конус, який обкочувався по внутрішній поверхні нерухомого конічного корпусу, подрібнюючи на своєму шляху шматки породи. Для забезпечення планетарного обкочувального руху конуса всередині нього було розміщено дебалансний вібратор [9]. У створених на використанні явища вібраційного підтримування обкочувального руху вібромашинах для зміцнення поверхні циліндричних деталей у якості масивних тіл, що співвдаряються між собою в процесі зміцнювальної обробки, слугували оброблювана деталь та віброуючий контейнер. Їх ударний контакт при цьому здійснювався через обмежену кількість сталевих кульок, які у процесі вібрації самовилаштовувались вздовж твірної зміцнюваної поверхні [9, 10, 11]. Ефективність такої зміцнювальної обробки була доволі високою. Для прикладу зміцнені за цією технологією барабани та реборди авіаційних коліс із кольорових металів та сплавів більш, ніж вдвічі підвищили свою довговічність та опір втомному руйнуванню [12].

Враховуючи її ефективність та відносну простоту реалізації саме вібраційно-відцентрова зміцнювальна обробка (ВВЗО) рекомендується для підвищення надійності та довговічності циліндричних деталей колісних візків залізничних вагонів. Однак, враховуючи той факт, що ВВЗО ґрунтується на нестандартній зміцнювальній технології і обладнання для її реалізації промисловістю не виготовляється, у кожному конкретному випадку обробки тої чи іншої деталі доводиться проектувати і виготовляти унікальне зміцнювальне обладнання.

На рис. 1 відображена принципова конструктивна схема зміцнювального модуля для обробки поверхневим пластичним деформуванням стабілізаторів колісних візків залізничних вагонів. Його основними складовими є циліндричний роз’ємний масивний обкатник 1, роз’ємні торцеві клемові затискачі 2 оброблюваного стабілізатора 3 та кріпильна рамка 4, на якій жорстко зафіксовані нерухомі частини клемових затискачів.

Зміцнювальну обробку стабілізаторів на даному модулі здійснюють наступним чином. За допомогою кріпильних отворів на рамі 4 модуль надійно фіксують на робочій платформі зміцнювальної вібромашини (див. рис. 2).

Клемові затискачі 2 кріплення оброблюваного стабілізатора 3 та обкатника 1 при цьому роз’єднані і відкриті для встановлення стабілізатора 3. У цьому неробочому розташуванні обкатник 1 лежить на прикріплених до нерухомих частин клемових затискачів 2 підставках 6. У внутрішню порожнину обкатника 1 завчасно до початку зміцнювальної обробки заванта-



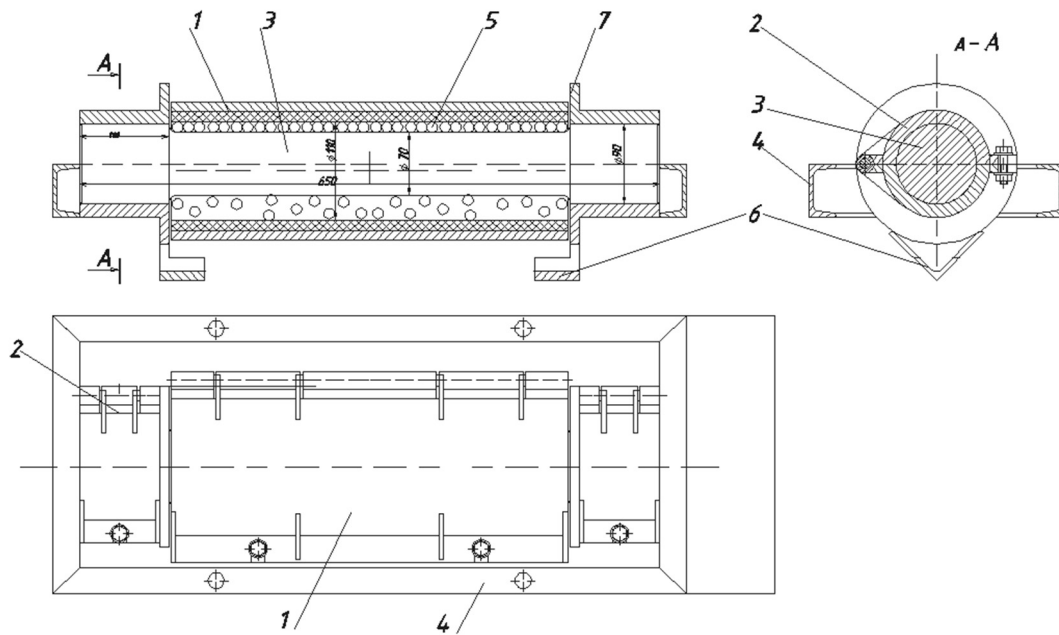


Рис. 1. Зміцнювальний модуль для обробки поверхневим пластичним деформуванням стабілізаторів колісних візків залізничних вагонів

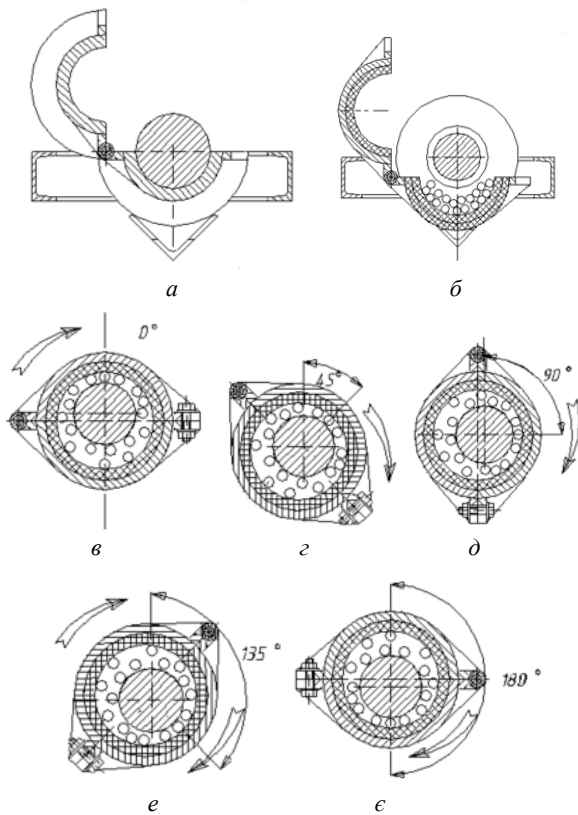


Рис. 2. (а, б, в, г, д, е, е) Встановлення зміцнюваної деталі в зміцнювальний модуль (а та б) та динаміка обкатника в процесі зміцнювальної обробки (в, г, д, е, е)

жено насипом певну кількість сталевих кульок діаметром 10–12,5 мм. Їх кількість попередньо визначають експериментальним шляхом із умови забезпечення обкочувального руху обкатника 1. У клемові затискачі 2 встановлюють підлягаючий обробці стабілізатор 3, закривають рухомі частини затискачів 2 і надійно їх скріплюють із рухомими, наприклад, за допомогою болтів. Оброблюваний стабілізатор 3 при цьому базується в циліндричних отворах затискачів. За одно і жорстко ними фіксується. У замкнутому вигляді обкатник 1 являє собою пустотіле циліндричне тіло довжиною  $L_{об}$ , що визначається із залежності:

$$L_{об} = l - (0,25 - 0,5) D_o,$$

де  $l$  – довжина робочої частини стабілізатора 3;  $D_o = 10-12,5$  мм – діаметр розташованих у обкатнику сталевих загартованих кульок 5, що виконують функцію деформівних тіл.

Внутрішня поверхня обкатника 1 вистелена шаром зносостійкої гуми або поліуретану і її внутрішній діаметр  $D_{min}$  рівний:

$$D_{min} = d + 2D_o + \epsilon = 2(D_o + 2A) + d,$$

де  $\epsilon = 4A$  – ексцентриситет обкатника;  $A = 3 - 4$  мм – амплітуда коливань привідної рами вібромашини;

$d$  – діаметр центральної робочої частини зміцнюваного стабілізатора 3.

Внутрішній проміжок між обкатником 4 і зміцнюваним стабілізатором 3 на 0,25–0,35 його

об'єму заповнюють деформівними тілами 5 у вигляді сталевих загартованих кульок. Насипний об'єм сталевих кульок в проміжку між обкатником 1 та зміцнювальним стабілізатором 3 рівний:

$$V_{\kappa} = 0,25 \cdot l (D_{\min}^2 - d^2).$$

Від випадання сталевих кульок із внутрішньої порожнини обкатника 1 узабезпечують торцеві диски 7, що прикріплені до нерухомої частини клемових затискачів 2. Їх зовнішній діаметр  $D_0$  повинен бути не меншим, ніж:

$$D_{\min} = d + 2D_0 + 2A.$$

Зміцнення циліндричної робочої поверхні стабілізаторів колісних візків залізничних вагонів на вище описаному зміцнювачі здійснюють у наступній послідовності. При відкритих обкатнику 1 та клемових затискачах 2 при наявності всередині обкатника 1 вище вказаної кількості сталевих кульок 5 встановлюють у затискачі підлягаючий зміцненню стабілізатор 3 і надійно його фіксують у клемових затискачах. З'єднують між собою половинки обкатника 1 і несучій рамі 4 надають плоско-паралельних кругових коливань із амплітудою  $A = 3-4$  мм в площині, що перпендикулярна геометричній осі зміцнюваного стабілізатора. Під дією цих кругових коливань вільно встановлений на поверхні зміцнюваного стабілізатора 3 обкатник 1 самовтягується у режим обкочувального руху своєю внутрішньою поверхнею по зміцнюваній зовнішній циліндричній поверхні стабілізатора 3. При цьому завдяки підбору співвідношення діаметрів стабілізатора 3, внутрішньої поверхні обкатника 1, діаметра  $D$  сталевих кульок та їх кількості обкочування обкатника відбувається по моно шару кульок, що вкриває оброблювану поверхню стабілізатора 3. Частота обкочувального руху обкатника 1 при цьому рівна частоті коливань привідної рами 4, тобто за кожен період коливного руху обкатник 1 здійснює один обкочувальний рух по зміцнюваній поверхні стабілізатора 3, повернувшись при цьому на певний кут навколо власної геометричної осі. Контакткування обкатника 1 із зміцнюваною поверхнею стабілізатора 3 при цьому відбувається через один ряд сталевих кульок 5, які самостійно розташовуються вздовж твірної зміцнюваної поверхні стабілізатора 3. Контакткування обкатника 1 із кожним черговим рядом сталевих кульок 5 відбувається з ударом, а тілами, що співвдаряються між собою, постають масивні обкатник 1 і зміцнюваний стабілізатор 3 з приєднаними до нього клемовими затискачами 2 та рамою 4.

На рис. 2 (а, б, в, г, д, е, є) відображені відкриті положення затискачів 2 із встановленою в них оброблюваною деталлю (рис. 2, а), наповнений деформівними сталевими кульками 5 розміщений на підставках б обкатник 1 із розкритою його половиною (рис. 2, б) та почергові розташування обкатника 1

відносно оброблюваної деталі 3 у процесі його обкочувального руху (рис. 2 в, г, д, е, є).

Сила  $F$ , із якою обкатник 1 в обкочувальному русі взаємодіє із оброблюваним стабілізатором 3, пропорційна масі тоб. обкатника 1, його ексцентриситету  $\varepsilon$  та квадрату кругової частоти  $\omega$  обкочувального руху, тобто

$$F = m_{об} \varepsilon \omega^2 = (2\Pi f)^2 \cdot m_{об} \cdot \varepsilon,$$

де  $\omega = 2\Pi f$  – кругова частота обкочувального руху обкатника 1 при частоті  $f$  кругових коливань привідного тіла (рами 4). Переважно частоту коливань привідної рами обирають із діапазону  $f = (17-24)$  Гц, базуючись на частотах обертання валів електродвигунів приводу вібротрищин [13, 14].

Одночасно із оброблюваною поверхнею стабілізатора 3 в ударному його контакті із обкатником 1 контактує вся кількість розташованого вздовж твірної оброблюваної поверхні деталі ряду сталевих кульок 5. Тому сила  $F$  ударного контакту обкатника із оброблюваним стабілізатором більш-менш рівномірно розподіляється між усіма вилаштуваними в ряд кульками 5. Тоді на окремо взятую кульку припадає лише частка сили ударної взаємодії, яка рівна

$$F_{\kappa} = \frac{F}{N} = \frac{F \cdot D}{l} = \frac{40}{l} (D \cdot m_{об} \cdot \varepsilon \cdot f^2).$$

Вважається, що згідно експериментальним даним для якісного забезпечення зміцнювальної обробки діаметр залишкового відбитка на зміцненій поверхні сталевій деталі повинен бути в межах діапазону  $d_0 = (0,8-1,0)$  мм. Тоді величину необхідних значень контактних напружень у поверхневому прошарку матеріалу зміцнюваної деталі у даному різновиді зміцнювальної обробки поверхневим пластичним деформуванням визначають із залежності

$$\sigma_{кон} = \frac{F_{\kappa}}{S_{\kappa}} = \frac{F_{\kappa}}{\frac{\Pi d_0^2}{4}} = \frac{4 \cdot F}{\Pi \cdot d_0^2} = \frac{50 \cdot D \cdot m_{об} \cdot \varepsilon \cdot f^2}{l \cdot d_0^2}.$$

Прирівнявши величину забезпечуваних контактних напружень  $\sigma_m$  зміцнюваного матеріалу можна одержати залежність для наближеного визначення маси обкатника 1 даного зміцнювального пристрою, а саме:

$$m_{об} = \frac{\sigma_m \cdot l \cdot d_0^2}{50 \cdot D \cdot \varepsilon_{об} \cdot f^2}$$

Основними технологічними параметрами, що матимуть визначальне значення у даному зміцнювальному процесі, являються:

– маса обкатника, нарощуванням якої збільшують силу ударної взаємодії деформівних кульок із оброблюваною поверхнею стабілізатора. А відповідно і глибину зміцнення металу в поверхневому прошарку;

- частота коливань привідної рами зміцнювального пристрою;
- тривалість зміцнювальної обробки.

Регулювання цих параметрів дозволяє оптимізувати процес зміцнювальної обробки робочої поверхні стабілізатора, уникаючи його перенаклепування.

На рис. 3 зображена принципова схема вібраційної машини для зміцнення ППД стабілізаторів колісних візків залізничних вагонів. Вібрмашина розрахована на одночасну зміцнювальну обробку чотирьох стабілізаторів. Її основними складовими елементами є пружно встановлена на пневмобалонах 1 на рамі 2 коливна платформа 3 та жорстко з'єднаний із платформою добалансний віброзбудник 4. По обидвох торцях платформи на з'єднаних із рамою 2 підставках розміщені електродвигуни 5 приводу обертання валів 7 дебалансів. Для зменшення передачі вібрацій від коливної платформи 3 на нерухому раму 2 вали електродвигунів з'єднано із валами дебалансів за допомогою еластичних пелюсткових муфт 6.

На плоскій коливній платформі 3 облаштовано місця для кріплення чотирьох зміцнювальних модулів (по два модулі у кожному з двох паралельних рядів). Жорсткість підвісу коливної платформи 3 регулюють величиною тиску повітря в пневмобалонах 1. Робота вібрмашини реалізується у резонансному режимі. Частота коливань платформи 3 рівна частоті обертання валів електродвигунів приводу 5. Переважно це 24 Гц.

Роботу обидвох торцевих електродвигунів приводу синхронізовано, їх вали обертаються в одному напрямку і без зміщення по фазі.

Тривалість зміцнювальної обробки однієї партії стабілізаторів приблизно 15 хвилин, ще 5 хвилин витрачається на заміну в зміцнювальних модулях оброблених стабілізаторів на нові підлягаючі обробці. Таким чином середня продуктивність зміцнення стабілізаторів на вібрмашині даної конструкції знаходиться в межах 10–12 штук впродовж однієї години експлуатації.

Зміцнювальна вібрмашина проста за конструктивною будовою, зручна в експлуатації та ремонті, не потребує висококваліфікованого обслуговування. Однак, як і переважача більшість технологічних вібрмашин, доволі шумна в експлуатації. Рівень генерованого нею шуму знаходиться в межах 35–40 децибел, що значно перевищує допустимі санітарно-гігієнічні норми. Тому при використанні вібрмашин даного типу необхідно облаштовувати їх розміщення в звукоізованих окремих приміщеннях.

Зміцнювальну обробку стабілізаторів здійснюють при неперервній подачі у робочу зону зміцнювальних модулів охолоджувальної рідини, ефективність зміцнювальної обробки усуваючи сухе тертя між сталевими кульками та металом зміцнюваної деталі. Для подачі охолоджувально-змащувальної

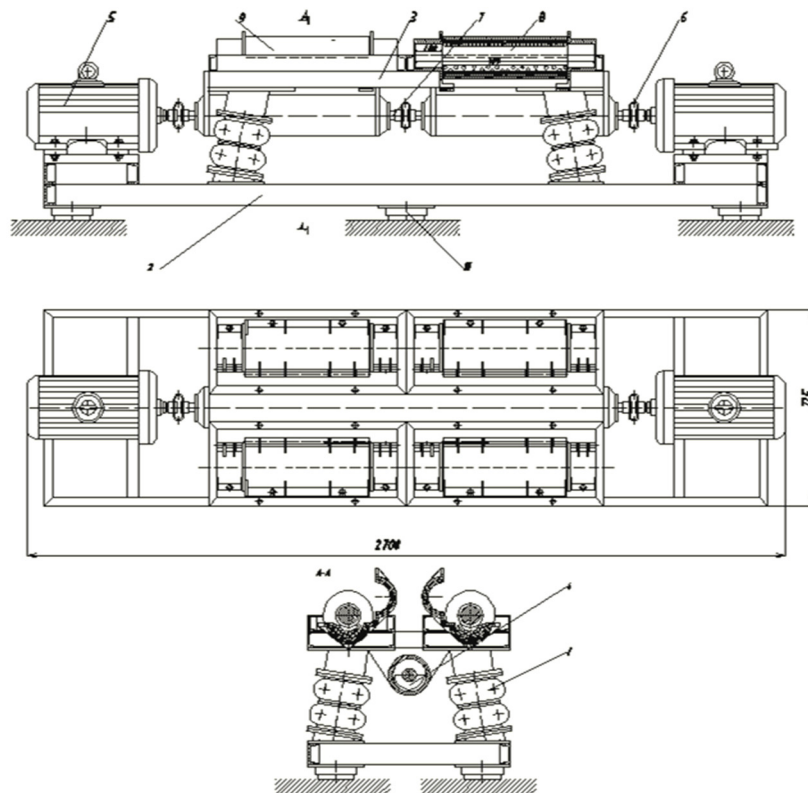
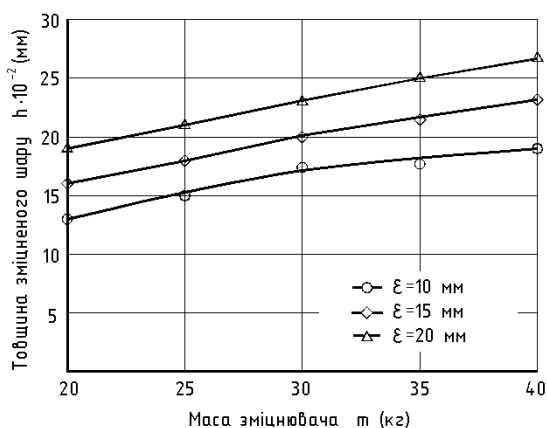


Рис. 3. Вібраційна машина для поверхневого зміцнення стабілізаторів колісних візків залізничних вагонів

рідини та її відведення у вібромашині передбачена індивідуальна система (на рисунках невідображена).

Регулюючи конструктивні та технологічні параметри зміцнювальної обробки у певних межах регулюють і силу контактної ударної взаємодії масивного обкатника із матеріалом зміцнюваної деталі. Тим самим у певних межах регулюють забезпечувану глибину зміцнення у поверхневих прошарках матеріалу, тривалість, а також рівномірність обробки. Зокрема, наприклад, зміна таких конструктивних параметрів як маса тоб. та ексцентриситет  $\varepsilon$  обкатника приводить до зміни сили  $F$  ударного контакту обкатника із матеріалом зміцнюваного стабілізатора при їх контакті через деформівні кульки. Відповідно змінюється і величина контактних напружень  $\sigma_{кон}$ , які розвиваються в місцях контактування сталевих кульок із поверхнею зміцнюваної деталі.

Із цих міркувань для оптимізації значень впливу конструктивних параметрів на показники якості зміцнювальної обробки проведено ряд експериментальних досліджень, результати яких частково відображено на рис. 4. Тут у вигляді графічної залежності відображено вплив ексцентриситету  $\varepsilon$  та маси  $m_{об}$  обкатника на глибину зміцнення  $h$ , мм. У якості дослідних фігурували циліндричні зразки діаметром  $D_o = 50$  мм із сталі марки сталь 45. Глибину зміцнення зразків виміряли на приладі моделі ПМТ-3, промірюючи в радіальному напрямку від зміцненої поверхні до центру зразків зміни мікротвердості їх матеріалу. Величину ексцентриситету  $\varepsilon$  обкатника призначали рівною 5, 7,5 та 10 мм. Масу обкатника  $m_{об}$  змінювали в діапазоні  $20 < m_{об} < 40$  кг, фіксуючи на обкатнику додаткові вантажі.



**Рис. 4.** Залежність товщини залягання зміцненого шару  $h$  (мм) від маси зміцнювача  $m$  (кг) при обробці циліндричних зразків ( $D_o = 50$  мм) із сталі 45

Експериментальним дослідженням виявлено, що при нарощуванні значень ексцентриситету та маси об-

катника глибина залягання зміцненого прошарку матеріалу зразків наростала, асимптотично наближаючись до певних максимальних значень, залежних переважно, від маси обкатника. Також встановлено падіння інтенсивності нарощування значень глибини зміцнення по мірі нарощування величини ексцентриситету. Це свідчить про доцільність обмеження ексцентриситету в межах  $\varepsilon = 10-10,5$  мм. Цей результат вагомий з тих міркувань, що наявність самозбурення динамічного явища обкочувального руху обкатника при гармонічних коливаннях його привідного тіла, у якості якого у даному випадку виступає поверхня зміцнюваної деталі, безпосередньо залежить від амплітуди коливань привідного тіла. У свою чергу, чим більша амплітуда коливань привідного тіла (зміцнюваної деталі) та масивної платформи, на якій встановлені зміцнювальні модулі, тим вищі енергозатрати на забезпечення коливних переміщень платформи. Тому із позицій економії енергії доцільно оптимізувати значення ексцентриситету обкатника із позицій мінімізації значень амплітуди коливань привідної платформи.

Поряд з тим експериментально встановлено, що надмірне нарощування маси обкатника, його ексцентриситету, а також тривалості обробки супроводжується появою ознак перенаклепування матеріалу зміцнюваної деталі в поверхневому його прошарку. Особливо активно прояви перенаклепування матеріалу спостерігаються при досягненні глибини зміцнення в межах 0,13–0,15 мм. Очевидно це є свідченням того, що для вібраційно-відцентрової зміцнення сталі марки 12ХНЗА максимально доступна і ефективна та доречна глибина зміцнення знаходиться в межах 0,13–0,14 мм. Із врахуванням вище означеного стає зрозумілою потреба із зміною розмірів зміцнюваних деталей, а також їх матеріалу конструктивні і технологічні параметри зміцнювачів даної конструкції піддавати уточненню експериментальною перевіркою [15, 16, 17].

Перевагою поверхневого зміцнення деталей, у тому числі і стабілізаторів колісних візків залізничних вагонів вібраційно-відцентровою зміцнювальною обробкою полягає у тому, що даний метод забезпечує формування в поверхневому прошарку металу залишкових напружень стиску високого градієнту. В основному це обумовлено ударною взаємодією масивних обкатника і зміцнюваної деталі при контактуванні їх через незначну кількість розташованих вздовж твірної оброблюваної поверхні деталі сталевих кульок. У процесі експлуатації зміцнених деталей, у тому числі і стабілізаторів, які піддаються знакозмінним циклічним навантаженням, стискаючи залишкові напруження надійно протистоять зарядженню втомних мікротріщин у товщі металу деталі. Як наслідок суттєво підвищується довговічність деталей, зростають їх міцність та надійність.

Певною перевагою вище описаної схеми вібраційно-відцентрової зміцнювальної обробки є її



універсальність та придатність для зміцнення широкого класу циліндричних довгомірних деталей. Так для залізничного транспорту, окрім стабілізаторів колісних візків залізничних вагонів, ця зміцнювальна обробка буде доволі ефективною для підвищення надійності та довговічності колісних осей візків різноманітного цільового призначення (локомотивних, пасажирських та вантажних вагонів, рухомого парку метрополітену тощо). Завдяки своїй універсальності дані зміцнювальна технологія та конструкція зміцнювача за незначних конструктивних прилаштувань можуть бути застосованими для підвищення надійності та довговічності півосей великотоннажного автомобільного транспорту, торсіонних валів спецтехніки та військових танків і самохідних артилерійських установок. Поряд з тим, завдяки якісному забезпеченому зміцненню та покращенню міцнісних характеристик дана зміцнювальна технологія могла б застосовуватися для зменшення маси та матеріаловмістимості бурових та обсадних труб свердловин, труб високого тиску, циліндричних деталей шасі літаків тощо.

## Висновки

1. Розроблено конструкцію і досліджено динаміку принципово нового устаткування для зміцнення поверхневим пластичним деформуванням поверхонь циліндричних протяжних деталей, зокрема стабілізаторів колісних візків залізничних вагонів. Дане устаткування оригінальне за своєю конструктивною будовою і не має аналогів у світовій практиці.

2. Розроблено математичні залежності, що описують обсяги забезпечуваного при даній зміцнюваній обробці рівня контактних напружень в матеріалі оброблюваних деталей, а також взаємозв'язок таких конструктивних параметрів зміцнювача як його маса та ексцентриситет. Експериментальною перевіркою визначено їх оптимальні значення та вплив на такий визначальний показник якості зміцнювальної обробки

як глибина проклепування поверхневого прошарку металу оброблюваної деталі.

3. Окреслено перелік основних конструктивних та технологічних параметрів зміцнювального процесу із використанням розробленої конструкції вібраційно-відцентрового зміцнювача, які мають визначальний вплив на ударну взаємодію обкатника із деформівними сталевими кульками та поверхні оброблюваної зміцненням деталі, а отже і на якісні показники зміцнювальної обробки.

4. Експериментальними дослідженнями встановлено, що забезпечувана вібраційно-відцентровою зміцнювальною обробкою глибина зміцнення при обробці циліндричних зразків із сталі 45, що володіє наближеними до матеріалу стабілізаторів колісних візків фізико-механічними властивостями, знаходиться в межах 0,11–0,13 мм. Попутно встановлено що нарощування сили ударної взаємодії обкатника з матеріалом зміцнюваних зразків, а також тривалості зміцнюваної обробки не сприяє нарощуванню значень глибини зміцнення, а провокує появу на обробленій поверхні зародків відшаровування металу зміцненої поверхні, тобто її перенаклепування. Це дає підставу для висновку про наявність оптимальних значень та рівнів конструктивних та технологічних параметрів процесу вібраційно-відцентрового зміцнення сталевих деталей, констатує неодмінну потребу в їх експериментальній перевірці та оптимізації при змінах розмірів чи матеріалу зміцнюваних деталей.

5. Окреслено перелік довгомірних деталей, що можуть ефективно зміцнюватися вібраційно-відцентровою обробкою як із метою підвищення їх експлуатаційних міцнісних характеристик, так і для зменшення маси з метою економії матеріалу. Найефективніша дана зміцнювальна обробка для деталей, які в процесі експлуатації піддаються ударним чи знакозмінним циклічним навантаженням. Наприклад, для осей та стабілізаторів колісних візків, торсіонних валів підвіски військових танків та великотоннажного транспорту спеціального призначення тощо.

## References

- [1] Ya.M. Kusii, A.M. Kuk, "Rozroblennya metodu vibratsiino-vidtsentrovorgo zmitsnennya dlya tekhnichnogo zabezpechennya bezvidmovnosti detalei mashin", *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, No. 1/7(73), pp. 41–51, 2015.
- [2] Ya.M Kusii, V.G.Topil'nits'kii, "Doslidzhennya yakosti poverkhni vibrozmeshchennikh detalei mashin", *Visnik natsional'nogo universitetu "L'vivs'ka politekhnika"*, No. 772, pp. 196–201, 2013.
- [3] Z. Stotsko, J. Kusyj and V. Topilnitskiyy, "Research of vibratory-centrifugal strain hardening on surface quality of cylindric long-sized machine parts", *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, Vol. 11, Lssue 1, pp 15–17, 2012.
- [4] K.A Dan'ko, I.V. Zorik, "Analiz sostoyaniya problemy povysheniya zhiznennogo tsikla detalei aviatsionnykh dvigatelei tekhnicheskimi metodami", *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, No. 4 (71), pp. 47–53, 2010.
- [5] I.S Aftanaziv et al., *Pidvishchennya nadiinosti detalei mashin poverkhnevimi plastichnim deformuvannyam*, Zhitomir, Ukraine: ZhITI, 2001.
- [6] I.F. Zanevskii, "Dinamika i raschet protyazhennykh vibratsionnykh mashin dlya obrabotki dlinnomernykh izdelii", *Avtoreferat dis. kand. tekhn. nauk, L'vov*, Ukraine, 1980.

- [7] I.S. Aftanaziv, Ya.M. Kusii, "Pristrii dlya zmitsnennya poverkhon' dovgomirnikh tsilindrichnikh detalei", No. 51720, Opubl. v Byul, No. 12, 2002.
- [8] I.I. Blekhman, *Sinkhronizatsiya dinamicheskikh system*, Moskva, Rossiya: Nauka, 1971.
- [9] I.S. Aftanaziv et al., *Vibratsionno-tsentrobezhnaya uprochnyayushchaya obrabotka detalei mashin*, Vinnitsa, Ukraina: VGU, 2002.
- [10] I. Aftanaziv et al., "Vibrational-centrifugal surface strengthening of drill and casing pipes", *Naukovii visnik Natsional'nogo girnichogo universitetu*, Vol. 167, No. 5, pp. 88–97, 2018. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/7>
- [11] I. Aftanaziv et al., "Development of a technology for the surface strengthening of barrel channels in the large-caliber artillery guns", *Skhidno-Evropeiskii zhurnal peredovikh tekhnologii*, Vol. 99, No. 3/1, pp. 11–18, 2019. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.167134>
- [12] I.S. Aftanaziv et al., "Pidvishchennya mitsnosti ta nadiinosti barabaniv kolis litaktiv zmitsnyuval'noyu obrobkoyu", *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, Vol. 149, No. 5, pp. 47–57, 2018.
- [13] I. Aftanaziv et al., "Improving reliability of drill pipe by strengthening of thread connections of its elements", *Naukovii visnik Natsional'nogo girnichogo universitetu*, No. 4, pp. 22–29, 2019. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/8>
- [14] I.S. Aftanaziv, L.I. Shevchuk and O.I. Strogan, "Pidvishchennya dovgovichnosti torsionnikh valiv ta dovgomirnikh detalei poverkhnevim plastichnim deformuvannyam", *Scientific Journal ScienceRise*, Vol. 21, No. 4/2, pp. 37–44, 2016.
- [15] V.I. Topchii and I.S. Aftanaziv, I.G. Svidrak, "Rozrobka ta modelyuvannya prystroyu dlya zmitsnennya kanaliv stvoliv garmat metodom vibratsiino-vidtsentrovoi obrobki", *Naukovii visnik L'vivskogo natsional'nogo universitetu veterinarnoi meditsini ta biotekhnologii imeni S.Z. Gzhits'kogo, Seriya "Kharchovi tekhnologii"*, Vol. 21, No. 91, pp. 118–123, 2019.

## Increasing the durability of cylindrical parts of wheelcarms of railway

I.S. Aftanaziv, L.I. Shevchuk, O.I. Strogan, L.R. Strutynska, I.V. Strogan

**Abstract.** A description of a new design of a vibrating machine for strengthening the surface plastic deformation of cylindrical long parts, in particular stabilizers of wheeled carriages of railway cars, is given. The main design and technological parameters of the process of vibration-centrifugal strengthening of these parts are outlined. The influence of technological parameters of this hardening process on such basic indicator of hardening processing as depth of hardening is experimentally investigated on cylindrical samples from 45 steel. Mathematical dependences for the choice of optimal values of design and technological parameters of this hardening treatment are given.

The list of long cylindrical parts for which vibration-centrifugal strengthening treatment is suitable and effective is outlined, among which torsion shafts of suspension of military tanks, axles of wheels of railway transport, drilling and casing pipes of gas and oil wells.

**Keywords:** hardening, surface plastic deformation, steel, stabilizer, steel balls, depth of hardening, railway transport

## Повышение долговечности цилиндрических деталей колесных повозок железнодорожных вагонов

И.С. Афтаазив, Л.И. Шевчук, О.И. Строган, Л.Р. Струтынская, И.В. Строган

**Аннотация.** Представлено описание новой конструкции вибрационной машины для укрепления поверхностным пластическим деформированием цилиндрических длинномерных деталей, в частности стабилизаторов колесных тележек железнодорожных вагонов. Определены основные конструктивные и технологические параметры процесса вибрационно-центробежного укрепления этих деталей. На цилиндрических образцах из стали 45 экспериментально исследовано влияние технологических параметров данного укрепляющего процесса на такой основной показатель укрепляющей обработки как глубина укрепления. Приведены математические зависимости для выбора оптимальных значений конструктивных и технологических параметров данной укрепляющей обработки.

Определены перечень длинномерных цилиндрических деталей, для которых пригодна и эффективная вибрационно-центробежная укрепляющая обработка, среди которых торсионные валы подвески военных танков, оси колес железнодорожного транспорта, буровые и обсадные трубы газо- и нефтедобывающих скважин.

**Ключевые слова:** укрепление, поверхностное пластическое деформирование, сталь, стабилизатор, стальные шарики, глубина укрепления, железнодорожный транспорт.