

В. В. АРТЕМЧУК, Ю. В. МИХАЙЛЕНКО, Н. А. МУХІНА, О. І. САБЛІН, Р. П. ГАНИЧ
(ДІПТ)

ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ШАРУВАТИХ МЕТАЛЕВИХ КОМПОЗИЦІЙ

У роботі проведено аналіз існуючих способів отримання шаруватих металевих композицій. Показано, що більшість представлених способів направлена на виробництво промислових виробів-заготовок. Застосування шаруватих металевих композицій повинно бути технічно та економічно обгрунтовано, оскільки їх отримання ускладнює виробничий (ремонтний) процес. Тому серед представлених способів були виділені ті, що найбільш прийнятні для ремонтного виробництва залізниці та наведені механічні властивості шаруватих матеріалів.

Ключові слова: шаруваті матеріали, механічні властивості, ремонтне виробництво, відновлення деталей

Вступ. Постановка проблеми. На думку багатьох спеціалістів можливості більшості конструкційних матеріалів на даний час вичерпані, що вимагає пошуків нових матеріалів або комбінації відомих для отримання нових властивостей. Одним із напрямків розвитку даного питання є застосування композиційних матеріалів. У свою чергу, шаруваті металеві матеріали є різновидом композиційних матеріалів, які складаються з двох або більше шарів підібраних таким чином, щоб властивості одержуваної композиції перевершували якісь (задані) властивості окремих складових її компонентів. Шаруваті металеві композиції можуть володіти підвищеною корозійною стійкістю, зносостійкістю, мати підвищений опір ударним навантаженням, демпфуючі якості, різну теплопровідність, високу міцність, в'язкість, пластичність, та інше. Тобто загальною перевагою шаруватих металевих композицій є поєднання у виробі різноманітних, інколи несумісних властивостей. Загальнопромисловий спектр застосування шаруватих матеріалів у світі вельми широкий: космічна техніка, авіація, суднобудування, хімічне виробництво, будівництво, військова техніка та інше. Як правило, шаруваті вироби мають меншу вагу, вартість, але при цьому володіють більшими експлуатаційними можливостями у порівнянні з моношаровими при тих же геометричних параметрах та умовах експлуатації. Найбільш поширене використання шаруватих матеріалів – це забезпечення корозійної стійкості або підвищення питомої міцності всього виробу. Причому міцнісні властивості шаруватого матеріалу можуть бути кращі, ніж міцність одношарового з одним компонентом, що входить у шарувату структуру цього матеріалу. Досягають поставленої мети застосуванням шаруватих матеріалів чергуванням шарів з високим

модулем пружності та міцністю з шарами більш пластичними. Іноді, по аналогії з іншими композиційними матеріалами, більш м'які шари називають матрицею [1].

В літературі існує багато досліджень, пов'язаних з композиційними матеріалами, і зокрема, шаруватими [1-9]. Однак ці дослідження носять в основному загально дослідницький характер або стосуються виробництва виробів, наприклад шаруватих листів-заготовок. Тому необхідність проведення комплексних досліджень для визначення можливості застосування зазначеної технології для потреб ремонтного виробництва залізниць є задачею актуальною.

Мета роботи. Дана робота є частиною робіт з комплексного дослідження та обгрунтування використання багатошарових металевих композитів для ремонту рухомого складу. Також необхідним є проведення аналізу способів отримання шаруватих композитів. Складовою частиною досліджень є визначення механічних властивостей шаруватих матеріалів.

Виклад основного матеріалу. Оскільки в наукових колах є розбіжності щодо поняття шаруватих металевих композиційних матеріалів, то коротко зупинимось на даному питанні. В науковій літературі часто можна зустріти визначення композиту, як сполуку двох або більше різних за хімічним складом різнорідних матеріалів з чіткою межею між ними. Крім того, композит повинен мати властивості не притаманні кожному окремому компоненту [1]. Проти такого визначення заперечень у літературних джерелах не знайдено, однак при цьому на території Радянського Союзу деякі науковці біметалеві та плаковані матеріали до композиційних матеріалів не відносили [2], а автор [3] виділяє плаковані матеріали в особливу групу

шаруватих металів. Проте, на нашу думку, це питання можна вважати дещо умовним. По-перше, і біметалеві, і плаковані матеріали можна віднести до композиційних матеріалів, оскільки обумовлені й прийняті в світі визначення ними виконуються. По-друге, на даний час визначення шаруватості також можна розширити. Вказані особливості при визначенні поняття шаруватості більш притаманні композитам на основі полімерів та волокнистих матеріалів. Власне кажучи, можна припустити, що вказане визначення і було поширено на металеві шаруваті композиції від волокнистих. Дійсно, наявність волокон (вусів) передбачає значне зміцнення матеріалу (покриття), але ці волокна утримуються у пластичній матриці. При такій будові необхідно мати розмежування між волокнами та основою (матрицею). Дещо подібне можна уявити при дисперсійній будові матеріалу, що також відносять до композиційного. При цьому виді композиційного матеріалу у порівняно м'якій, пластичній основі (матриці) рівномірно або нерівномірно по товщині розташовують тверді, високоміцні частки. При дисперсійному зміцненні деталей також необхідно розмежування між міцними частками та пластичною матрицею, хоча ці частинки повинні бути щільно охоплені матрицею, як і волокна.

Тепер розглянемо інший різновид композиційних матеріалів – це покриття з шаруватою структурою. При цьому складно погодитись з тим, що шари повинні бути обов'язково відокремлені між собою. Розглянемо це коротко. Якщо шари отримані шляхом послідовного нанесення різномірних матеріалів, наприклад, при наплавленні шару міді на сталеву основу; напиленні дротів або порошоків на основу, що відрізняється за хімічним складом; електролітичному осадженні хрому, нікелю, міді та ін. на сталеву основу, то буде чітко виражена шарувата структура. Однак, на нашу думку, слід також вважати шаруватими покриття, які отримані і з одного матеріалу, але мають різну структуру по товщині. Наприклад, при наплавленні, напиленні та гальванічних методах нанесення покриттів шари можуть мати різну мікроструктуру, а головне властивості. Навіть сталеву загартовану деталь вважають такою, що має шарувату структуру, хоча матеріал деталі незмінний. Головним фактором, що спонукає до таких висновків – це явище синергичності шаруватого покриття (матеріалу) з певними співвідношеннями та властивостями шарів, хоча при цьому виконаного з одного матеріалу. Таким чином, надалі домовимось і такі покрит-

тя називати шаруватими (побудованими «по вертикалі») композитами на відміну від широко відомих дисперсних та волокнистих.

Отримують шаруваті матеріали різними способами. За кордоном в промислових умовах поширені основні чотири види одержання шаруватих виробів: з'єднання пластин прокаткою, пресування біметалевих профілів, зварювання вибухом і пайка твердим припоєм [4].

В роботі Астрова Е. І. [3] значно розширена кількість методів отримання багатошарової структури у порівнянні з закордонними авторами, в якій до вказаних вище методів додані ще: створення накладних покриттів шляхом їх склеювання, припаювання але по зовнішньому периметру або механічного скріплення; електрохімічне нанесення одних металів на інші в процесі електролізу; термодифузійні методи; створення гарячого покриття; наплавлення та металізація розпиленням металу на основний метал, сплав або готовий виріб; металокерамічні методи; конденсаційні методи; хімічне покриття; лиття; зварювання, комбіновані методи та інші.

Перераховані вище методи Астров Е. І. класифікує за фізико-хімічними процесами одержання нероз'ємних з'єднань металів (плакованих) [3]:

- зчеплення (схоплювання) при взаємодії твердих металів з розплавленими;
- зчеплення твердих металів між собою при їх сумісному пластичному деформуванні;
- зчеплення в результаті дифузійних процесів спікання.

З'єднання металевих пластин прокаткою [4] засноване на дії високого тиску від валків поєданого з високою температурою нагріву пакета. Попередня температура нагріву пакета відповідає температурі деформації матеріалів в плакованому пакеті. Для захисту внутрішньої частини від впливу атмосфери, перед прокаткою пакет проварюється по периметру. Рівномірний високий тиск прокатного стану разом з високою температурою нагріву пакета дозволяє здійснити з'єднання і отримати композиційний матеріал з міцним металургійним зв'язком його компонентів. Після прокатки кромки обрізають, проводять очищення і при необхідності термообробку пакету [4].

Композиції з можливими поєднаннями основного та плакуючого металу різноманітні, при цьому товщина зовнішніх шарів коливається в межах 3...20 % від загальної товщини шаруватого матеріалу й залежить від області застосування. Основні параметри процесу – тиск

та температура залежать від властивостей вихідних матеріалів та необхідної кінцевої товщини пакету [3].

Пресування біметалічного профілю найбільш ефективний для одержання суцільного дроту, прутків і плоских чотирикутних профілів. Основним механізмом з'єднання є дифузійне з'єднання під тиском, в процесі якого чисті металеві поверхні тісно стикаються один з одним [4].

Зварювання вибухом або з'єднання вибухом – дозволяє швидко та відносно економічно з'єднувати різнорідні метали. Перевагами даного методу є висока якість зварного з'єднання листів, висока швидкість, універсальність, здатність здійснювати з'єднання різнорідних металів при неможливості отримання іншими методами. Зварювання вибухом доцільно застосовувати для плакування трубопроводів, з'єднання труб з листами, плакування поверхонь зносу деталей двигунів та обладнання для ядерних реакторів і хімічних процесів [4].

Процес з'єднання вибухом в основному включає формування високошвидкісної ударної хвилі, що видаляє поверхневий шар кожного із з'єднуваних металів, а одержувані чисті поверхні під впливом тиску вибуху утворюють міцне металургійне з'єднання. Таким чином цей процес задовольняє основним умовам з'єднання будь-яких двох металів: чистота поверхонь та щільне з'єднання очищених поверхонь. Сполуки металів за допомогою даного методу не обмежена відмінностями в точках плавлення або пластичності з'єднуваних металів [4]. Детонацію викликають на одному кінці рухомої плити або листа металу; вибух змушує рухому пластину ударяти по нерухомій з динамічним тиском, набагато вищим, ніж межі текучості з'єднувальних металів. Необхідно створити умови, при яких в точці зіткнення швидкість зближення металевих листів менше швидкості поширення звуку в цих двох металах, тоді на нижній поверхні рухомої плити утворюється ударна хвиля, яка очищує поверхні розділу, після чого під дією тиску вибуху відбувається їх з'єднання [4]. Проблема полягає в тому, що більшість вибухових речовин має швидкість детонації 7 000-8 000 м/с, а швидкість звуку в з'єднувальних матеріалах складає приблизно 6 000 м/с, тому точку зіткнення розташовують під кутом, тим самим зменшуючи швидкість зіткнення листів [4]. Під впливом значної пластичної деформації в точці удару відбувається розпилення та розплавлення металу, що призводить до тісного контакту і з'єднанню свіжеочищених металевих поверхонь. Значна кінетична енергія рухомого листа притискує по чергово

шари, забезпечуючи їх з'єднання до тих пір, поки їй вистачає на розпилення металу в точці удару [4].

Пайка твердим припоєм полягає у використанні рідкої металевої фази, яка при затвердінні з'єднує дві пластини металу між собою. Пакет нагрівають до температури вище за температуру плавлення припою та нижче за температуру плавлення листів, після чого пластини пакету притискають. Виготовляють припій у вигляді фольги або дроту, застосовують з флюсом або без нього [4].

При механічному скріпленні металевих шарів застосовують заклепування, болтові інші з'єднання. Термодифузійні методи полягають в дифузії металів при підвищених температурах із зовнішнього середовища в поверхневі шари іншого металу або сплаву. Створення гарячого покриття виконують зануренням напівфабрикатів і готових виробів в розплавлені метали або солі. Металокерамічні методи засновані на спіканні та пресуванні або прокатці порошків з різнорідних металів або порошків на підкладці з суцільного металу. Конденсаційні методи здійснюють випаровуванням металів у вакуумі та осадженням їх на поверхні, що покривається або обробкою металів в атмосферах, що містять газоподібні карбоніти або хлориди металів. Хімічне покриття металів проводять в розчинах сполук, що містять метал, який наноситься на поверхню. Лиття, як метод, здійснюють заливанням розплавленого металу в форму зі вставленими в неї твердими складовими з іншого металу або заливкою в форму двох металів, а також заливанням металу на рухомі стрічки; отримання біметалів на відцентрових установках розливання [3].

Інша класифікація запропонована у роботі [5], згідно якій визначальними є умови протікання процесів на межі шарів металів, що з'єднуються за їх станами у зоні контакту: тверді шари, твердий з рідким, рідкі. Створення сполук металів у твердому стані передбачає вплив високого тиску.

З'єднання металів з пластичним або без пластичного деформування покладене в основі класифікації у роботі [6]. У групу з застосуванням пластичного деформування входять: прокатка, пресове зварювання, пресування. У групу з'єднання шарів металів без пластичного деформування – наплавлення, лиття, пайка, хімічні методи, зварювання плавленням, нанесення покриттів газотермічними методами, електролітичні методи нанесення покриттів.

Існують і інші класифікації, але вони більше стосуються з'єднуванню шарів металу зварю-

ванням, наприклад, зварювання тиском (холодне зварювання), плавленням, тиском разом з плавленням.

До названих вище додамо метод тертя з перемішуванням, який на даний час активно розвивають науковці Інституту Електрозварювання ім. Є. Б. Патона. Даний метод відрізняється від відомого зварювання тертям, хоча і має деякі спільні риси. Метод є перспективним, володіє широкими можливостями, хоча, як і будь-який інший, має свої недоліки.

На нашу думку, зазначені вище класифікації та методи заслуговують уваги та детального розгляду, але наукові дослідження та практичне застосування розроблених технологій стосуються виробництва шаруватих металевих виробів у вигляді листів, труб, злитків і т.д., як конструкційних матеріалів-заготівок. Накопичений досвід може бути використаний для виготовлення нового рухомого складу. Наприклад, вельми перспективним буде використання шаруватих (достатньо біметалевих) листів для обшивки кузовів локомотивів або пасажирських вагонів, де маловуглецева (відносно дешева) сталь (основа) буде захищена корозійностійким шаром. Перспективність даного напрямку очевидна і потребує лише економічного обґрунтування використання тієї або іншої технології виготовлення шаруватих виробів. У той же час підкреслимо, що представлені способи отримання шаруватих виробів не можуть бути автоматично застосовані до ремонтного виробництва через економічну й технологічну недоцільність або неможливість. Доцільність використання того або іншого методу визначається існуючою технологічною оснасткою на локомотиво- та вагоноремонтних заводах і депо. На даний час, за нашими даними, на ремонтних підприємствах Укрзалізниці відновлення деталей шаруватими покриттями доцільно проводити, застосовуючи наплавлення, газотермічні та електролітичні методи. В деяких випадках також доцільно долучати пайку, наприклад, для відновлення контактів електричних апаратів. Таким чином, немає необхідності детально аналізувати переваги та недоліки всіх існуючих способів, а можна коротко зупинитись на останніх. Розглянемо можливість використання зазначених технологій для відновлення деталей.

Шарувате наплавлення володіє широкими можливостями, переваги та недоліки даного методу фактично співпадають з перерахованими вище і є відомими. Однак особливістю багатошарової структури наплавлених шарів є те, що

найбільш поширені види наплавлення мають суттєве проплавлення основного металу, перемішування хімічних елементів в наплавлених шарах. Вирішення зазначеної проблеми полягає у ретельному підборі наплавочних матеріалів, присадок та флюсу. У той же час шарувате наплавлення однозначно є перспективним способом відновлення деталей. Тим більше, що цей метод вже зарекомендував себе, як позитивний, коли для покращення якості наплавлення використовують підшари.

Газотермічне напилення шаруватих покриттів мають високі технологічні та експлуатаційні властивості напилених поверхонь. Особливо значному розширенню можливостей напилених поверхонь сприяє використання порошків. І хоча структура газотермічного покриття сама по собі є шаруватою, даний метод дозволяє в широких межах змінювати властивості по товщині покриття в залежності від умов напилення та складових сумішей напилюваного матеріалу. Однак більшість напилених покриттів мають недолік – чутливість до розтягуючих напружень, що в деякій мірі обмежує можливості вказаного методу, особливо при знакозмінних навантаженнях. Також методи газотермічного напилення, особливо електродугова металізація та газополум'яне напилення мають підвищену пористість.

Перспективним напрямком розвитку відновлення деталей багатошаровими покриттями є електролітичні методи. За допомогою «керованої» мікروشаруватості при електролітичних методах можливо формувати покриття не тільки з високим рівнем функціональних властивостей, але і стабілізувати останні на довгий час внаслідок їх термодинамічної стійкості. Отримувати шаруваті електролітичні покриття можна різними способами. Це може бути комбінація різних покриттів з різних електролітів, наприклад, залізо-нікель-хром, залізо-нікель-мідь, залізо-хром, залізо-цинк та ін. Можна отримувати покриття однакового хімічного складу, але різне по структурі, використовуючи декілька електролітів. На наш погляд, доцільно отримувати шаруваті електролітичні осади в одній гальванічній ванні, в одному електроліті, застосовуючи нестационарні режими.

Імовірно, що не менші позитивні ефекти будуть також спостерігатись при електроосадженні багатошарових біметалевих покриттів – композитів. При цьому формування шарів можливе із різних металів, а також із сплаву з різною концентрацією його компонентів в шарах. Мікро- і макрошари у таких композитах мо-

жуть виконувати як «власне» функціональне призначення, так і давати ефект при своїй сумісній роботі. В першому випадку їх функціями є: створювати перехідні шари, які покращують зчеплення і зменшують вплив залишкових напружень; створювати теплозахисні бар'єри; забезпечувати високу антифрикційність та ін. В другому випадку шаруватий композит вміщує в собі давно відоме правило і дуже важливе явище – сумісна робота різнорідних матеріалів дає результат, який не може бути досягнутий при використанні окремо взятого матеріалу.

Однією з головних проблем при створенні композиційних матеріалів є напруження, які впливають на адгезію та здатність матеріалу витримувати навантаження без руйнування [7]. Виникає необхідність розглянути деякі механічні властивості шаруватих металевих матеріалів.

Результати досліджень для листів з комбінаціями сталей Ст15 та Ст60 в різних послідовностях та кількостях наведені в роботі [3]. При цьому у всіх шаруватих поєднаннях співвідношення товщини компонентів (Ст15 та Ст60) було рівними. Перед проведенням досліджень механічних властивостей зразки піддавали одній із термічних обробок: відпалу, гартуванню та відпуску. Механічні дослідження проводили на розтяг, удар та циклічну міцність [3].

Статичне розтягування зразків 10×6×120 проводили зі швидкістю деформації 20 мм/хв. Для динамічного розтягування використовували маятниковий копер з розмірами зразка 10×10×60, при цьому зразки досліджували після нормалізації. Дослідження на циклічну міцність проводили по методу навантаження консольного зразка. Методика проведення досліджень описана в роботі [3]. Твердість *HB* однорідних зразків товщиною 10 мм із Ст15 і шаруватих із зовнішніми шарами із Ст15: після відпалу – до 100, після нормалізації – 128, після гартування та відпуску – 160. Те ж саме, але для Ст60: 180 *HB*, 212 *HB*, 450 *HB*. Зразки для випробувань на витривалість мали твердість біля 60 *HRC*. Листові зразки товщиною 1 мм Ст60 мали твердість 240 *HB* (нормалізація), 550 *HB* (гартування та відпуск), 60 *HRC* - для випробувань на витривалість. Результати досліджень наведені у табл. 1, 2. Для зручності введемо деякі позначення комбінації шарів: одношарові (моношарові) зі сталі 15 – М15; одношарові зі сталі 60 – М60; поєднання шарів сталей 15–60–15 будемо позначати 1, а комбінацію 60–15–60 цифрою 2. Перед позначенням комбінації (1 або 2) будемо ставити кількість шарів в матеріалі, наприклад, зразки тришарові зі сталей 15–60–15 – позначаємо – 3.1 і т. д.

Таблиця 1

Механічні властивості шаруватої сталі товщиною 10 мм при статичному розтягуванні [3]

Номери зразків	Комбінація шарів та матеріал зразка	Стан зразків									
		Відпалені			Нормалізовані			Загартовані			
		$\sigma_b, 9,8 \cdot 10^6$ Н/мм ² (кг/мм ²)	$\delta, \%$	$\psi, \%$	$\sigma_b, 9,8 \cdot 10^6$ Н/мм ² (кг/мм ²)	$\sigma_{0,2}, 9,8 \cdot 10^6$ Н/мм ² (кг/мм ²)	$\delta, \%$	$\psi, \%$	$\sigma_b, 9,8 \cdot 10^6$ Н/мм ² (кг/мм ²)	$\delta, \%$	$\psi, \%$
М15	Одношарові зі сталі 15	37	34	64	40	25	31	62	50	22	55
М60	Одношарові зі сталі 60	61	19	40	75	55	17	39	140	2,5	5
3.1	Тришарові зі сталей 15–60–15	50,4	22,3	42,5	56,9	42,4	19,2	41,6	96,4	2,7	5,5
5.1	П'ятишарові зі сталей 15–60–15–60–15	49,6	21,8	41,9	58,5	38,8	20,4	42,3	96,7	2,5	5,8
9.1	Дев'ятишарові зі сталей 15–60–15–60–15–60–15–60–15	28,5	22,5	43,1	57,2	41	20,9	42,5	95,8	3,0	6,1
3.2	Тришарові зі сталей 60–15–60	49,2	22,0	42,0	56,6	40,6	19,8	40,9	94,5	3,1	5,4
5.2	П'ятишарові зі сталей 60–15–60–15–60	50,1	21,4	43,5	56,5	39,4	21,0	42,1	97,0	2,8	5,2
9.2	Дев'ятишарові зі сталей 60–15–60–15–60–15–60–15–60	49,7	21,9	41,8	58,1	41,8	20,6	41,5	95,3	3,2	5,0

Механічні властивості шаруватої сталі товщиною 10 мм при динамічному розтягуванні [3]

Номери зразків	Комбінація шарів та матеріал зразка	Стан зразків						
		Відпалені		Нормалізовані		Загартовані		
		$\sigma_B 9,8 \cdot 10^6$ Н/М ² (КГ/ММ ²)	$\delta, \%$	$\sigma_B 9,8 \cdot 10^6$ Н/М ² (КГ/ММ ²)	$\delta, \%$	$\sigma_B 9,8 \cdot 10^6$ Н/М ² (КГ/ММ ²)	$\delta, \%$	$\Psi, \%$
M15	Одношарові зі сталі 15	35,5	32	39,5	30	52	20	57
M60	Одношарові зі сталі 60	64	18	75	17	145	3,0	5,0
3.1	Тришарові зі сталей 15–60–15	49,5	21,3	56,2	20,6	97,3	3,4	5,6
5.1	П'ятишарові зі сталей 15–60–15–60–15	50,2	20,8	58,0	18,8	99,1	4,1	5,2
9.1	Дев'ятишарові зі сталей 15–60–15–60–15–60–15–60–15	48,8	21,6	57,6	19,3	98,6	3,9	6,0
3.2	Тришарові зі сталей 60–15–60	51,3	21,3	55,8	21,2	99,5	3,5	5,8
5.2	П'ятишарові зі сталей 60–15–60–15–60	48,7	20,9	59,1	19,6	100,2	3,0	5,2
9.2	Дев'ятишарові зі сталей 60–15–60–15–60–15–60–15–60	51,5	21,0	57,4	20,4	97,9	3,3	5,0

Як витікає з таблиць 1, 2 механічні властивості шаруватих зразків – тимчасовий опір, відносне подовження та звуження при розтягненні займають проміжні значення між показниками однорідних матеріалів, а також значення вказа-

них показників близькі між собою при статичному та динамічному навантаженнях.

Для практичних задач важливими є результати випробувань шаруватих матеріалів на удар (табл. 3).

Таблиця 3

Ударна в'язкість a_n зразків (надріз 1 мм) шаруватої сталі товщиною 10 мм, $9,8 \cdot 10^4$ Дж/м² (КГС/СМ²) [3]

Номери зразків	Комбінація шарів та матеріал зразка	Місце надрізу зразка	Стан зразків		
			Відпалені	Нормалізовані	Загартовані
M15	Одношарові зі сталі 15	Як у стандартного зразка Менаже	Не зруйновані, кут загибу 90°	Не зруйновані, кут загибу 80-85°	Не зруйновані, кут загибу 60°
M60	Одношарові зі сталі 60	Те ж	8,5	7,0	1,2
3.1	Тришарові зі сталей 15–60–15	Поверхня зовнішнього шару Торці шарів	Не зруйновані, кут загибу 45-50° 10,2	Не зруйновані, кут загибу 45-50° 10,0	12,5 3,5
5.1	П'ятишарові зі сталей 15–60–15–60–15	Поверхня зовнішнього шару Торці шарів	Не зруйновані, кут загибу 45-50° 10,1	Не зруйновані, кут загибу 45-50° 9,5	11,0 3,0
9.1	Дев'ятишарові зі сталей 15–60–15–60–15–60–15–60–15	Поверхня зовнішнього шару Торці шарів	18,5 9,5	16,9 9,3	7,5 4,0
3.2	Тришарові зі сталей 60–15–60	Поверхня зовнішнього шару Торці шарів	10,5 9,8	9,2 9,1	2,5 3,2
5.2	П'ятишарові зі сталей 60–15–60–15–60	Поверхня зовнішнього шару Торці шарів	11,2 9,5	9,8 8,9	3,3 3,5
9.2	Дев'ятишарові зі сталей 60–15–60–15–60–15–60–15–60	Поверхня зовнішнього шару Торці шарів	12,5 10,2	11,3 9,0	4,5 3,8

Згідно результатів табл. 3 найбільшу ударну в'язкість мають зразки з більш «м'якими» та товстими зовнішніми шарами (зразки 3.1 і 5.1, де зовнішні шари виконані зі Ст15 товщиною 2,5 та 1,7 мм відповідно). При цьому вказані

зразки, які пройшли термічну обробку – відпал або нормалізацію, не руйнувались подібно одношаровим зі Ст15. Також видно (табл. 3), що ударна в'язкість зразків 9.1 нижче, ніж 3.1 і 5.1,

але вище за М60. Зниження a_n зразків М60 Ас- тров Е.І. пояснює знаходженням дна надрізу на межі з більш твердим (крихким) шаром Ст60. Ударна в'язкість зразків 3.2–9.2 нижче ніж у розглянутих вище, але вище ніж у однорідних одношарових М60. Очевидно, що більші значення a_n зразків 3.2–9.2 у порівнянні з одношаровими М60 пов'язані з наявністю більш в'язких шарів (Ст15). Цікавим фактом є те, що при торцевому ударі (надріз знаходиться також на торці) кількість та розташування шарів на ударну в'язкість не впливає.

Не менш важливим є визначення міцності втоми (табл. 4, 5).

Як бачимо (табл. 4, 5), шаруваті зразки з поверхневими шарами зі Ст15 витримують у 2–14 разів більше циклів до повного руйнування у порівнянні з моношаровими з Ст15. Також видно, що витривалість шаруватих зразків більше, ніж одношарових із Ст60. Дещо неочікуваним став результат, де зразки 9.2 мали витривалість навіть нижче ніж 3.2, хоча максимальне значення σ_{-1} мають зразки 5.2. Можливо, це пов'язано з властивостями самих шарів композиції та співвідношенням їх товщин, при якому

відбувається перерозподіл напружень. Фридманом Я. Б. встановлено, що викривлення напруженого стану біля межі розділу шарів підвищує межу плинності та схильність до крихкого руйнування менш міцного шару [8]. У той же час випробування на продавлювання за методом Еріксена показали, що із збільшенням кількості шарів значення глибини продавлювання також збільшуються, майже незалежно від порядку чергування шарів. Даний факт пов'язують з усередненням пластичних властивостей при тонких шарах за рахунок дифузії вуглецю на межах розділу шарів [3]. Аналогічні випробування на витривалість зразків товщиною 1 мм показали дещо іншу картину: зразки з поверхневими шарами зі Ст60 (тришарові з товщиною зовнішніх шарів 0,25 мм та п'ятишарові з товщиною 0,17 мм) мали у два рази більшу межу витривалості $588 \cdot 10^6$ Н/м² (60 кг/мм²), ніж у одношарових із Ст15 $294 \cdot 10^6$ Н/м² (30 кг/мм²) та майже у два рази ніж одношарові зі Ст60 $345 \cdot 10^6$ Н/м² (35 кг/мм²) [3]. Тобто шаруваті зразки за опором втоми перевищують однорідні (моношарові) їх складових, що є важливим та перспективним для використання.

Таблиця 4

Витривалість зразків шаруватої сталі товщиною 10 мм [3]

Позначення зразків	Верхня межа навантаження $\sigma_b, 9,8 \cdot 10^6$ н/м ² (кг/мм ²)	Кількість циклів до руйнування	Характер руйнування
М60	46,4	279000	У затиску
	35,7	663600	» »
	33,8	1610000	20 мм від переходу
	28,6	$5 \cdot 10^6$	Без руйнування
3.2	53,8	8000	40 мм від переходу
	37,8	140100	Посередині
	33,7	$5 \cdot 10^6$	Без руйнування
	36,4	$5 \cdot 10^6$	» »
5.2	50,9	365200	Біля переходу
	39,1	$5 \cdot 10^6$	Без руйнування
	42,0	$5 \cdot 10^6$	» »
	45,7	$5 \cdot 10^6$	» »
	48,6	$5 \cdot 10^6$	» »
9.2	65,3	8000	Біля переходу
	48,9	9200	» »
	38,2	1929000	» »
	28,6	$5 \cdot 10^6$	Без руйнування
	33,7	$5 \cdot 10^6$	» »

Витривалість листових зразків шаруватої сталі товщиною 1 мм після гартування в маслі та відпустки при температурі 473 К [3]

Позначення зразків	Комбінація шарів та матеріал зразка	Верхня межа навантаження σ_b , $9,8 \cdot 10^6$ н/м ² (кг/мм ²)	Кількість циклів до руйнування	Характер руйнування
M15	Одношарові зі сталі 15	30	226 200	У місці затиску зразка
M60	Одношарові зі сталі 60	35	10 ⁷	Без руйнування
M60	Одношарові зі сталі 60	60	73 500	У місці затиску зразка
3.1	Тришарові із зовнішніми шарами зі сталі 15 товщиною 0,25 мм	30	517 500	То же
5.1	П'ятишарові із зовнішніми шарами зі сталі 15 товщиною 0,17 мм	30	1 118 300	» »
9.1	Дев'ятишарові зразки із зовнішніми шарами зі сталі 15 товщиною 0,1 мм	30	3 326 100	» »
3.2	Тришарові із зовнішніми шарами зі сталі 60 товщиною 0,25 мм	55	10 ⁷	Без руйнування
3.2	Тришарові із зовнішніми шарами зі сталі 60 товщиною 0,25 мм	60	10 ⁷	» »
5.2	П'ятишарові із зовнішніми шарами зі сталі 60 товщиною 0,17 мм	55	10 ⁷	» »
5.2	П'ятишарові із зовнішніми шарами зі сталі 60 товщиною 0,17 мм	60	10 ⁷	» »
9.2	Дев'ятишарові із зовнішніми шарами зі сталі 60 товщиною 0,1 мм	45	10 ⁷	» »
9.2	Дев'ятишарові із зовнішніми шарами зі сталі 60 товщиною 0,1 мм	55	1 516 000	» »
9.2	Дев'ятишарові із зовнішніми шарами зі сталі 60 товщиною 0,1 мм	60	735 000	У місці затиску зразків

При ударних навантаженнях загартовані шаруваті зразки без надрізу товщиною 1 мм мали ударну в'язкість краще, ніж аналогічні з моношарової Ст60, тришарові 3.1 не ламались, як і М15, а відпалені та нормалізовані не ламались взагалі. Таким чином, застосування шаруватих матеріалів при ударних навантаженнях також є доцільним.

Аналогічно до наведених вище були проведені дослідження шаруватих покриттів, у тому числі наплавлених. Для цього було проведено наплавлення восьми шарів на довгий торець пластини зі сталі Ст3 розмірами 16×150×400 мм (рис. 1). Режим наплавлення дротом діаметром 2,6 мм під флюсом АН-26: струм – 350...400 А, напруга 30...32 В, швидкість наплавлення – 37 м/год.



Рис. 1. Схема вирізки зразків для дослідження властивостей наплавленого металу:

- 1 – зразки для дослідження структури і для вимірів твердості; 2 – зразки для дослідження зносостійкості; 3 – зразки МІ-12 для випробувань на розтяг, витривалість та ударну в'язкість

Були проведені дослідження механічних властивостей металу, наплавленого порошковим дротом ПП-Нп-Г13Х13Н2МФ, дротом Св-08Г2С, 14ГСТ та їх комбінації. В даній роботі наведена частина отриманих результатів. Механічні властивості наплавленого металу досліджували при температурі 20 °С при випробуванні на розтяг зразків типу МІ-12 ($d_0 = 6$ мм)

по ГОСТ 6996-66. В результаті проведених досліджень були отримані наступні результати: $\sigma_T = 433$ МПа; $\sigma_B = 667$ МПа; відносне подовження – 18,5 %; відносне звуження – 23 %. Для порівняння, механічні властивості якісної катаної вуглецевої сталі 20 за ГОСТ-1052: $\sigma_T = 250$ МПа; $\sigma_B = 410$ МПа;

відносне подовження – 25 %; відносне звуження – 55 %. Таким чином, наплавлений метал по міцнісним властивостям перевершує сталь 20 і дещо поступається їй за пластичними властивостями. Найбільш вигідним з точки зору підвищення витривалості виявилось поєднання наплавлення Св-08Г2С (перші шари) з дротом ПП-Нп-Г13Х13Н2МФ (робочі шари).

Для оцінки циклічної довговічності зразків, наплавлених без і з пластичним підшаром, можна використати рівняння Гудмена, яке за даними [10] задовільно описує граничний стан пластичних матеріалів при асиметричному циклічному навантаженні.

Рівняння Гудмена для межі витривалості τ_R при асиметричному циклі для дотичних напружень має вигляд:

$$\tau_R = \tau_{-1} \left(1 - \frac{\tau_s}{\tau_b} \right), \quad (1)$$

де τ_s - середнє значення залишкового дотичного напруження;

τ_{-1} - межа витривалості для симетричного циклу;

τ_b - межа міцності (тимчасовий опір).

Якщо прийняти значення τ_{-1} і τ_b для даного матеріалу постійними величинами, то збільшити межу витривалості τ_R можна за рахунок зменшення залишкових дотичних напружень, τ_s наприклад, за рахунок наплавлення підшару.

З урахуванням (1) запас втомної міцності по амплітудному напруженню визначаємо за формулою [11]:

$$n = \frac{\tau_a}{\tau_R} = \frac{\tau_a}{\tau_{-1} (1 - \tau_s / \tau_b)}, \quad (2)$$

де τ_a і τ_s - розрахункові амплітудне та середнє значення залишкового дотичного напруження для зразка.

Граничному стану відповідає значення $n=1$, тобто, чим ближче до 1 значення n , тим нижче запас втомної довговічності. Вихідні дані для розрахунків втомної довговічності та їх результати наведені в табл. 6 і 7.

Таблиця 6

Запас втомної довговічності (n) при наплавленні з підшаром

Матеріал	θ_s , °C	σ_b , МПа	τ_b , МПа	τ_{-1} , МПа	τ_a , МПа	τ_s , МПа	n
Зносостійкий шар	400	1250	722	361	125	329	0,637
Підшар	110	313	181	90	17	60	0,28
Основний метал	86	424	245	122	8	69	0,09

Таблиця 7

Запас втомної довговічності (n) при наплавленні без підшару

Матеріал	θ_s , °C	σ_b , МПа	τ_b , МПа	τ_{-1} , МПа	τ_a , МПа	τ_s , МПа	n
Зносостійкий шар	440	1240	694	347	121	432	0,92
Основний метал	120	422	246	121	20	100	0,27

Порівняння даних, представлених в останніх колонках табл. 6 і 7, показує, що наплавлення пластичного підшару підвищує запас втомної довговічності в зовнішньому зносостійким шарі \approx на 35 % і \approx в 3 рази - в основному матеріалі.

Висновки. Використання шаруватих матеріалів відкриває широкі можливості, зокрема, поєднуючи в шаруватому матеріалі різні за пластичністю та міцністю шари можна підвищувати механічні властивості: межу плинності, тимчасовий опір, ударну в'язкість, межу витривалості та ін. Причому найбільш значущим є властивості та товщина верхнього шару, у меншому ступені кількість шарів наплавлення.

Нанесення шаруватих відновлювальних покриттів є також перспективним та доцільним напрямком розвитку відновлювальних техноло-

гій при ремонті зношених деталей рухомого складу. Встановлено, що використання шаруватого наплавлення дозволяє частково компенсувати дію термічного впливу та зменшити внутрішні напруження, тим самим збільшивши втомну міцність у порівнянні з моношаровим наплавленням. Таке можливе при певному підборі матеріалів наплавлення. Також встановлено, що при певних комбінаціях наплавлених шарів збільшується ударна в'язкість у порівнянні з моношаровим наплавленням. Однак слід зазначити, що найбільш впливає на вказані механічні властивості – основа деталі та поверхневий шар покриття.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Коллективная монография по композиционным материалам [Текст] / Л. Браутман, Р. Крок / Tsai S. Air Force Rep. 1966. A FML-TR-66-149 – 661 с.
2. Портной, К. И. Классификация композиционных материалов [Текст] / К. И. Портной, А. А. Заболоцкий и др. // Порошковая металлургия, 1977. – № 12.
3. Астров, Е. И. Плакированные многослойные металлы [Текст] / Е. И. Астров. – М. : Металлургия, 1965. – 239 с.
4. Коллективная монография по композиционным материалам [Текст] / Л. Браутман, Р. Крок. 661 с.
5. Райт, Е. С. Слоистые металлические композиционные материалы [Текст] / Е. С. Райт, А. П. Левит // Композиционные материалы с металлической матрицей. – М. : Машиностроение, 1978. – № 4. – С. 48–105.
6. Лашко, Н. Ф. Металловедение сварки [Текст] / Н. Ф. Лашко, С. В. Лашко-Авакян. – М. : Машгиз, 1954. – 272 с.
7. Король, В. К. Основы технологии производства многослойных металлов [Текст] / В. К. Король, М. С. Гильденгорн. – М. : Металлургия, 1970. – 237 с.
8. Победря, Б. Е. Механика композиционных материалов [Текст] / Б. Е. Победря. – М. : Изд-во МГУ, 1984. – 336 с.
9. Фридман, Я. Б. Вопросы прочности материалов и конструкций [Текст] / Я. Б. Фридман, Е. М. Морозов. – М. : Изд-во АН СССР, 1959. – № 1. – 144 с.
10. Артемчук, В. В. Реологічні властивості багатшарових матеріалів [Текст] / В. В. Артемчук. // Вісник ДПТУ. – Д., 2011. – Вип. 37. - С. 20-25.
11. Махненко, В. И. Ресурс безопасности эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций [Текст] / В. И. Махненко. – К. : Наук. думка, 2006. – 618 с.
12. Сенченков, И. К. Расчет остаточных и циклических напряжений при многослойной наплавке и оценка их влияния на усталостную прочность и термическую стойкость наплавленного металла [Текст] / И. К. Сенченков, И. А. Рябцев, О. П. Червинко, И. А. Кондратьев // Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». 36. ст. – К. : ІЕЗ ім. Є. О. Пато́на, 2009. - С. 595-601.

Надійшла до редколегії 30.03.2012.

Прийнята до друку 09.04.2012.

V. V. ARTEMCHUK, YU. V. MIKHAYLENKO, N. A. MUKHINA, O. I. SABLIN, R. P. GANICH

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ

В работе проведен анализ существующих способов получения слоистых металлических композиций. Показано, что большинство представленных способов направлено на производство промышленных изделий-заготовок. Применение слоистых металлических композиций должно быть технически и экономически обосновано, поскольку их получение усложняет производственный (ремонтный) процесс. Поэтому среди представленных способов были выделены те, которые наиболее приемлемы для ремонтного производства железной дороги, а также приведены механические свойства слоистых материалов.

Ключевые слова: слоистые материалы, механические свойства, ремонтное производство, восстановление деталей

V. ARTEMCHUK, Y. MIKHAYLENKO, N. MUKHINA, O. SABLIN, R. GANICH

RATIONALE FOR USE AND THE MECHANICAL PROPERTIES OF LAYERED METAL TRACKS

In this paper we analyze existing methods for producing layered metal compositions. It is shown that the majority of the methods presented focus on the production of industrial products, billets. The use of layered metal compositions must be technically and economically justified, since they receive complicates the manufacturing (repair) process. Therefore, among the presented methods were identified, those which are most suitable for the production of railway maintenance, and shows the mechanical properties of layered materials.

Keywords: layered materials, mechanical properties, the production of repair, restoration parts