

Є. С. Клемешов¹, к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-6486-5319

І. Ю. Приходько¹, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-5651-8106

О. Є. Меркулов¹, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7867-0659

¹ Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ СТВОРЕННЯ ПЛАСКИХ БАГАТОШАРОВИХ БІМЕТАЛІЧНИХ КОМПОЗИЦІЙ ТА ШЛЯХИ ЇХ ВИРІШЕННЯ

Анотація. Однією з тенденцій сучасного виробництва є пошук матеріалів здатних замінити сталь, при цьому отримавши переваги та прибравши недоліки в характеристиках та властивостях виробів. Таким матеріалом є біметалічні та багатошарові композити. В даній роботі представлено аналіз сучасного стану розробок з питань виготовлення біметалічних та багатошарових композитів. В першу чергу зроблено акцент на технологіях виготовлення біметалічних композитів, які підрозділяють на дві категорії: із застосуванням деформації та без застосування деформації. Зроблено висновок, що найбільш розповсюдженим, найбільш простим та ефективним методом отримання біметалів та багатошарових композиційних матеріалів є прокатка. Аналіз тенденцій сучасних досліджень у сфері отримання біметалів показав, що більшість робіт присвячено розрахунку енергосилових параметрів процесу прокатки, параметрів деформування та стану поверхні зразків для отримання з'єднання, механічними властивостям композиційних виробів із різноманітним поєднанням сталей та кольорових металів, дослідженню структури зразків у місці з'єднання. Також важливим питанням є визначення міцності з'єднання, яке на даний час оцінюється при розрахунку напружень в осередку деформації чи виходячи з експериментальних та статистичних даних сумарного ступеня деформації. При розрахунках в наш час доволі часто використовується комп'ютерне моделювання, яке дозволяє змоделювати процес сумісної деформації двох та більше шарів металу, однак воно не дозволяє розраховувати можливість з'єднання шарів. В роботі розроблено математичну модель отримання багатошарової біметалічної композиції Ag-Cu-Ag методом прокатки, яка дозволяє оцінити вплив параметрів процесу деформування на напружений стан шарів металу. На основі аналізу сучасних розробок, визначено, що питанню розрахунку та оцінки з'єднання шарів приділено недостатню увагу, тому сформульовано критерій з'єднання шарів металу. Показано доцільність створення класифікації діапазонів значень критерію для оцінки ступеню міцності з'єднання шарів біметалевих виробів.

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CCBY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode/uk>

Ключові слова: прокатка, біметал, композит, з'єднання, математична модель.

Посилання для цитування: Клемшов С. С., Приходько І. Ю., Меркулов О. С. Аналіз проблем створення плоских багатошарових біметалічних композицій та шляхи їх вирішення. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 400-414. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-400-414>.

Вступ. В даний час активний розвиток отримала галузь розробки композитних і композиційних матеріалів, зважаючи на широкий спектр застосування, а також необхідність розвитку та поліпшення тих областей, де неможливо або не доцільно застосування звичайних сталей і сплавів.

До методів виготовлення композиційних матеріалів відноситься дуже широкий спектр технологій. Слід зазначити також, що всі методи можна розділити на ті що використовують обробку тиском (пресування, прокатка, зварка вибухом та ін.), та ті що не використовують (лиття, зварка, наплавлення, напилення та ін.).

Процес зварювання прокаткою продемонстрував значний потенціал і може бути класифікований як твердотільний процес, у якому велика механічна деформація створюється в металевому листі з або без застосування тепла для зміни мікроструктури або для створення зв'язків між декількома металевими листами [1]. Наприклад, з'єднання методом прокатки — це технологія, яка зазвичай використовується для виробництва плакованих пластин, для захисту від корозії або зносу, викликаного ерозією, які зустрічаються в різних важливих галузях промисловості. Деякі з переваг процесу з'єднання прокаткою перед звичайними процесами виробництва та з'єднання включають простоту та легкість роботи, економію коштів, бажані механічні властивості та можливість застосування до різномірних матеріалів.

Зварювання прокаткою вимагає ретельної підготовки поверхонь, що зварюються, так як поверхневі забруднення і окисні плівки мають великий вплив на міцність зварного з'єднання. Щоб уникнути окислення цих поверхонь, при нагріванні пакети герметизують дуговим зварюванням. Необхідно забезпечити високу міцність зварних швів, руйнування яких у процесі прокатки призводить до браку. Підготовка поверхонь, що зварюються, дещо спрощується за рахунок вакуумування і мимовільного очищення поверхонь від оксидів при нагріванні герметичних пакетів під прокатку. Вирішальне значення зварювання прокаткою має другий етап. На цій стадії за рахунок значних пластичних деформацій досягається фізичний контакт по всій площині дотику деталей, що з'єднуються. У тих місцях, де є фізичний контакт, виникає зв'язок між атомами металів і утворюється зварне з'єднання.

При виготовленні деталей з плакованого прокату як обов'язкову технологічну операцію застосовують загартування, що забезпечує необхідні експлуатаційні властивості (зносостійкість, міцність, самозагострення). Внаслідок значної різниці в об'ємних змінах матеріалів основного та плакуючого шарів деформація деталей з біметалу може бути великою, що є причиною спотворення проектної форми виробів. Вибираючи сталі основного та плакуючого шарів з близькими коефіцієнтами термічного розширення або змінюючи співвідношення товщин шарів, можна уникнути значних деформацій біметалу [2, 3].

При розгляданні комбінацій металів у композиті слід зауважити, що поєднання властивостей різних металів дозволяє зосередити характеристики виробів та окремих їх частин на необхідній властивості, чи то міцність, в'язкість, зносостійкість, корозійна стійкість тощо. Вперше такі розробки використовувалися в авіабудуванні при створенні фюзеляжів літаків для надання їм корозійної стійкості у поєднанні з міцністю та зменшенням ваги. Композити, виконані з високоміцних алюмінієвих сплавів з прошарками з алюмінію або титану, мають більш високий ресурс, ніж монолітні матеріали. Прокатно-зварні панелі, виконані з алюмінієвих сплавів різних марок, з одностороннім або двостороннім розташуванням каналів застосовують як теплообмінну апаратуру літальних апаратів [4].

Сталева чи інша металічна проволочка, яка застосовується в якості зміцнювача, суттєво відрізняється від крихких борних, вуглецевих та інших волокон своєю пластичністю. Це дозволяє застосовувати проволочку при виготовленні композиційних матеріалів за допомогою прокатки, динамічного пресування та ін. Окрім цього, сталева проволочка на сьогоднішній день – найбільш дешевий та технологічний зміцнювач, який не містить дефіцитних компонентів та добре освоєний промисловістю [5].

Корозійні процеси руйнації, що посилюються останні десятиліття стійким погіршенням екологічної обстановки практично у всіх промислово розвинених країнах, знищують за рік до 20% щорічного світового виробництва заліза і сталі і завдають шкоди, що обчислюється в 3,5-5% річного національного доходу. За даними експертних оцінок в Україні збитки від корозії становлять 10-15 % усієї продукції чорних металів. Вартість протикорозійного захисту у хімічній, нафтохімічній, металургійній промисловості досягає 10-15% від загальної вартості будівельних конструкцій. Кожні три роки необхідно перефарбовувати 75% металоконструкцій та 10-20% замінювати через корозійне зношування [6].

Проводячи аналіз сучасних розробок можна підкреслити, що метою

дослідження може бути будь яка частина технологічного процесу, наприклад - підбір матеріалів та можливість їх з'єднання для отримання особливих якостей виробу, розрахунок енерго-силових параметрів деформування для отримання міцного з'єднання або необхідної товщини виробу, впливу температурних характеристик розплаву на міцність з'єднання, та інше[7]. Незважаючи на активний розвиток, особливо в західних країнах, технологій отримання біметалів (таких, як плакування вибухом, нанесення наплавленого шару та ін), основним методом отримання корозійностійких біметалічних листів є пакетна гаряча прокатка [8]. У загальному випадку до енергосилових параметрів процесу прокатки відносять зусилля та роботу деформування, а також пов'язані з ними можливість руйнування робочого інструменту чи обладнання [9], або отримання з'єднання між шарами композиту[10]. У цьому дослідженні розглянуто методику розрахунку відносного обтиснення при холодній прокатці, необхідного для створення з'єднання шарів. Розрахунок проводиться за відомими формулами А.І. Целікова [11] як для моно металу, тому що плакуючий шар дуже тонкий та швидко зміцнюється. В результаті розрахунків отримано величину відносного обтиснення $\epsilon_s = 0,488-0,536$, що є дуже близьким до отриманих експериментальних даних, де мінімальний відносний ступінь деформації для отримання з'єднання шарів дорівнює 0,45-0,5. Окрім цього в роботі приведені розрахунки міцності з'єднання шарів металу, які проводяться через розрахунок ступенів деформування зсуву. Підмічено також, що міцність з'єднання залежить не тільки від якості зачищення поверхонь з'єднання, а також від зміцнення деякого шару металу після механічної обробки поверхонь. Показано, що деформація первинного схоплювання знижується при зменшенні товщини поверхневих плівок.

Для того, щоб почати аналіз проблем теоретичних розрахунків, по перше треба визначитися, які саме розрахунки використовують для опису технологічного процесу виготовлення біметалічного або багатошарового композиту. Також слід зазначити, що наступний аналіз торкається лише процесу отримання біметалів та багатошарових композитів методом прокатки, хоча на сьогоднішній день розробки пов'язані із теоретичним розрахунком процесу також ведуться і для інших методів ОМТ.

Якщо звернутися до інших важливих напрямків розрахунку технологічного процесу прокатки біметалічних та багатошарових композитів, які відрізняються від звичайного розрахунку прокатки штаби або листа, слід також зауважити напрямок визначення з'єднання шарів в процесі деформування.

В роботі [12] представлені дослідження процесу прокатки

біметалічної заготовки алюміній-сталь. В роботі зазначено, що дослідження проводилися із застосуванням як фізичної моделі, так і математичного розрахунку методом кінцевих елементів. Для фізичної моделі застосовано розрахунок методом «верхньої межі». Цей метод засновано на розрахунку швидкостей в осередку деформації та зсувних напружень. Саме зсувні напруження автор використовує для порівняння та аналізу міцності з'єднання шарів в залежності від сумарного ступеня деформації. До висновків цієї роботи відноситься твердження, що цей метод оцінки міцності з'єднання показав добрі результати, як в розрахункових теоретичних даних та даних комп'ютерного моделювання, так і в даних фізичних експериментів, що дозволяє прогнозувати (не в повній мірі) міцність з'єднання шарів металу.

В роботі [13] представлені дані дослідження прокатки біметалічної заготовки алюміній-мідь при різних параметрах процесу, а саме: температурі, діаметрі валків та сумарному ступеню обтиснення. З висновків роботи слідує, що збільшення температури зменшує контактний тиск в наслідок зменшення опору деформації. Контактний тиск впливає на напруження зсуву, які, в свою чергу, впливають на міцність з'єднання шарів металу, і це доведено наступним чином: при збільшенні діаметра валків збільшується контактна поверхня валків з металом, яка, в свою чергу, збільшує контактний тиск та напруження зсуву, при цьому контактний тиск збільшується при збільшенні ступеня деформації, що відображається у збільшенні міцності з'єднання шарів з 12 Н/мм² при 10% обтиснення до 40 Н/мм² при 30% обтиснення.

Взагалі існують різні теоретичні моделі для пояснення різних аспектів процесу з'єднання листів прокаткою. Більшість моделей з'єднання прокаткою зосереджено на контролі параметрів процесу, тоді як деякі моделі розвинули взаємозв'язок між еволюцією мікроструктури та міцністю з'єднання. Дослідники в роботі [15] запропонували наступне рівняння для оцінки міцності з'єднання:

$$\eta = \frac{\sigma_B}{\sigma_0} = R_f(2 - R_f), \quad (1)$$

де σ_B – міцність з'єднання; σ_0 – міцність базового металу; η – ефективна міцність з'єднання; R_f – сумарний ступінь деформації.

В роботі [16] наведена трохи інша формула ефективної міцності з'єднання, яка залежить від граничної деформації:

$$\eta = H \left(1 - \frac{(1-R_f)^2}{(1-R_t)^2} \right), \quad (2)$$

де H – емпіричний фактор зміцнення; R_t – граничний рівень деформації.

Таким чином, можна зробити висновок, що проблемою розрахунку

міцності з'єднання, згідно з усім вищевказаним, є складність розрахунку напружень зсуву в осередку деформації із за великої кількості вхідних даних та різних механічних властивостей металів, що з'єднують. З цим може допомогти комп'ютерне моделювання. Так, наприклад, в роботах [12, 13, 16] математичне моделювання використовується для отримання даних щодо величини еквівалентної пластичної деформації, напруження плинності, та нерівномірності формозміни шарів при використанні різних металів в пакеті прокатки.

На даний час не має програми, яка б могла відтворити процес зварювання листів при деформуванні, або визначити можливість з'єднання. Для цього доводиться аналізувати результати фізичного експерименту та математичного моделювання, зокрема напружень зсуву, та за формулами розраховувати (або постфактум вимірювати) ефективність з'єднання та його міцність.

Мета дослідження. Аналіз сучасних технологій та розробок зі створення композитів та композиційних матеріалів на основі металів. Визначення найбільш перспективних технологічних процесів та створення базових методів їх комп'ютерного моделювання

Результати дослідження. Авторами статті виконана робота у рамках партнерства співробітників Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України та Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering CO.,LTD. (ZRIME)(Zhengzhou, P.R.China). Основною ціллю роботи було виконати підготовку та провести спільні експериментальні прокатки триметалічної композиції Ag-Cu-Ag з досягненням з'єднання шарів у процесі плакування.

Перш за все необхідно було оцінити можливості прокатного лабораторного обладнання. Для прокатки було використано стан з кліттю дуо, з максимальною потужністю 100кВт, а діаметр валків складає 500 мм, довжина бочки 800 мм. Розрахункова сила прокатки, у першому наближенні, складає 500 кН. Момент прокатки 18 кНм, потужність прокатки 7,12 кВт за швидкості 0,1 м/с. За максимальної швидкості прокатки 0,3 м/с потужність прокатки буде в межах 22 кВт. Тобто знаходиться у допустимих межах технічних характеристик стану (до 100 кВт). Оціночний рівень коефіцієнта тертя при захопленні та в процесі прокатки прийнятий 0,1

При обтисканні композиції вихідною сумарною товщиною $3+10+3=16$ мм у валках діаметром 500 мм зі ступенем деформації 50% кут захвату металу валками становитиме 0,19 рад. Орієнтовне значення коефіцієнта тертя при процесі прокатки, що встановився, становить 0,1. Умова захоплення при процесі прокатки, що встановився, тримається на межі, а умова захоплення не виконується, тому необхідні заходи для забезпечення первинного захоплення

композиції валками. А саме: Внутрішній мідний шар завтовшки 10 мм повинен виступати у напрямку прокатки композиції на 45 мм для того, щоб саме цей внутрішній шар першим захопили валки. Для забезпечення кута самогальмування клина зовнішні шари зі сплаву 5081 повинні мати клиноподібну форму зі зменшенням товщини до нуля на передній ділянці завдовжки 30 мм. На рисунку 1 представлено схему пакету Ag-Cu-Ag.

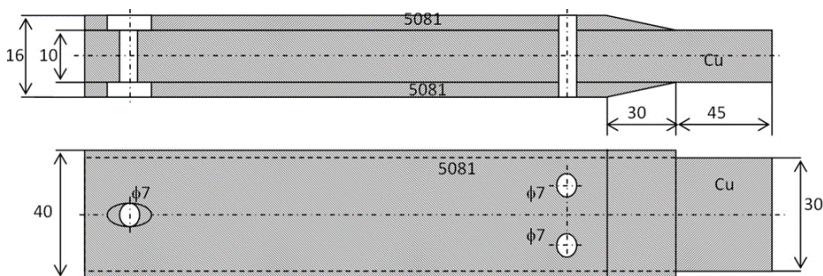
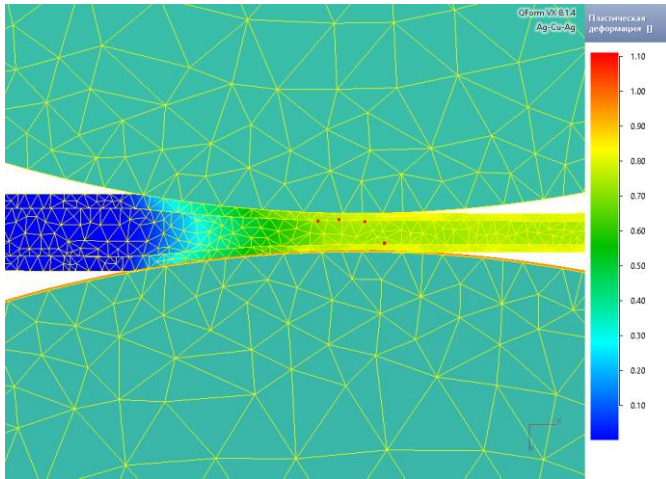


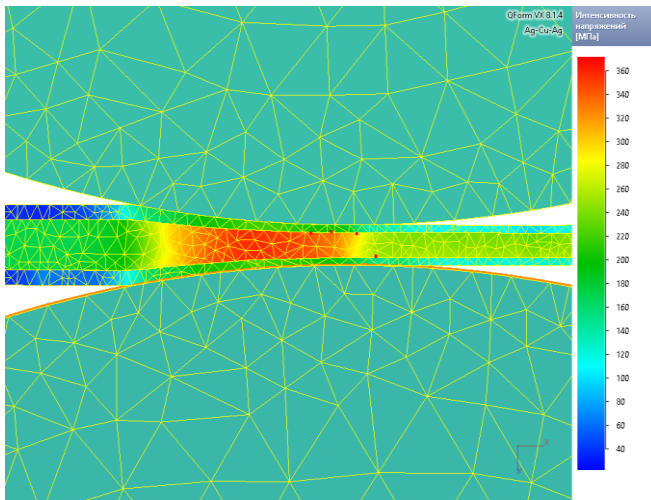
Рисунок 1 – Схема пакету зразків Ag-Cu-Ag

Під час комп'ютерного моделювання враховували теплові процеси із простим теплообміном. Швидкість обертання валків діаметром 500 мм прийняли 10 об/хв (0,262 м/с). В якості заготовки використаний композит із двох пластин зі сплаву 5081 (плакуючі) та основної мідної пластини. Композит подається у валки за допомогою штовхача, який рухає заготовку зі швидкістю 100 мм/с вздовж осі прокатки. Процес прокатки здійснюється при температурі заготовки та деформуючого інструменту 20°C. Тертя в контактні валків з шарами, що плакують, в процесі задано за законом тертя Леванова. Коефіцієнт тепловіддачі 30 000 Вт/м²К. На рисунку 2 представлено деякі попередні результати комп'ютерного моделювання в програмі QForm VX8.1.4.

Виконано експериментальні дослідження реологічних властивостей матеріалів – міді та сплаву 5081. Значення межі плинності для двох матеріалів близькі, незважаючи на те, що межа міцності сплаву 5081 приблизно вдвічі вище, ніж у міді. Мідь у відпаленому не наклепаному стані є пластичним матеріалом і може зазнавати вищі пластичні деформації до руйнування, ніж сплав 5081, не дивлячись на вищі значення його межі міцності. Мідь має значно вищі показники відносного подовження. Однак при ступені накопиченої деформації 30% пластичні властивості матеріалів (відносно подовження) близькі. Величини межі плинності помітно різняться у сфері невеликих обтискань (до 10%). Тобто попередня холодна деформація міді 10% повністю вирівнює опір деформації двох матеріалів.



а



б

Рисунок 2 – Результати комп'ютерного моделювання процесу прокатки пакету Ag-Cu-Ag: а) пластична деформація, б) інтенсивність напружень

Під дією однакових напружень по висоті осередку деформації у вхідній області, коли ще немає попередньої холодної деформації металу, ступінь деформації міді значно перевищує ступінь деформації сплаву 5081.

Виходячи із встановлених закономірностей зміни межі плинності залежно від ступеня попередньої холодної деформації, а також виходячи з необхідності забезпечити ступінь частинного обтиснення між 50 і 70% для з'єднання шарів біметалу, вихідні товщини шарів прийняті обернено пропорційними значенням середньої межі плинності в діапазоні ступеня деформації %, а саме – у співвідношенні 1,2 мм (Cu): 1,1 мм (5081). Цей рівень загальної товщини пакета 3,4 мм вибраний з тим розрахунком, щоб отримати проміжну товщину композиції 1,2-1,5 мм (з частинним обтисканням 56-65%), яку необхідно піддати дифузійному відпалу і подальшій багатопрхідній холодній прокатці на кінцеву товщину 0,5 мм із ступенем сумарної деформації 58-67%. Після чого отриману біметалічну композицію знову піддати рекристалізаційному відпалу при температурі 500°C та травлення.

З метою поліпшення з'єднання композиції було виконано підготовку поверхні перед плакуванням, але підготовка поверхні не забезпечила очікуваного результату, хоча у літературних джерелах цей прийом рекомендований як ефективний.

При ступені деформації порядку 60% і вище відбувався поздовжній розрив зразків і формування викривлень частин зразка, що надірвалися, у бік розширення металу. Припущення про те, що це є наслідком застосування клепки не виправдалися, тому що зміна позиції клепки ближче до центру по довжині зразка не змінила результат. Встановили, що поздовжній розрив зразків відбувається через інтенсивне розширення більш гарячого і пластичного мідного шару. Внутрішній мідний шар, розширюючись, розтягував зовнішній шар холоднішого сплаву 5081, який розривався вздовж.

Виконано аналіз можливостей зменшення розширення металу, серед яких обрано можливості впливу діаметра валків, коефіцієнта тертя при прокатці, вихідної ширини зразків та ступеня деформації. Найбільш ефективний метод – зменшення ступеня обтиснення. Зменшення обтиснення дозволило вирішити проблему поздовжнього розриву зразка, але в той же час це трохи знизило міцність з'єднання шарів. Визначено компромісне рішення між міцністю з'єднання та цілісністю зразка.

Проведене кінцево-елементне моделювання процесу прокатки показало наступні результати.

Початкова різниця температури перед прокаткою в мідному шарі та шарах сплаву 5081 становить близько 100-120°C. Прогріта рівномірно до 300°C заготовка в процесі перенесення до прокатного стану остигає, причому більш інтенсивно в зовнішніх шарах сплаву 5081 температура яких на момент завдання у валки приблизно 100°C. При цьому мідний шар має температуру близько 220°C а передній кінець не прикритий

шаром сплаву 5081 має температуру близько 180°C.

Мідний шар зазнає інтенсивнішого розігріву в процесі деформації, який досягає 50°C, в той час як шар зі сплаву 5081 розігрівається в середньому тільки на 25°C. На виході з осередку деформації у зовнішньому шарі спостерігається зниження температури до значень, рівних температурам на вході (близько 145 ° C). Мідний шар при цьому остигає менше, в середньому на 20°C, і його температура становить близько 165°C. По віддаленню від осередку деформації у напрямку прокатки температура у шарах вирівнюється.

Перед і за зоною деформації в шарі сплаву 5081 виникають нерівномірності напружень уздовж напрямку прокатки, причому розтягувальні напруження концентруються ближче до бокових кромки. А в мідному шарі ближче до кромки концентруються стискаючі поздовжні напруження. Розтягуючі напруження поперек напрямку прокатки концентруються в центрі по ширині смуги і в мідному шарі і в шарі сплаву 5081.

Концентрація розтягуючих напружень у сплаві 5081 в близьких до кромки областях на виході з осередку деформації ближче до передньої кромки композиції вказує на звичайне місце початку тріщини руйнування, а концентрація поздовжніх і поперечних напружень, що розтягують, в центральній частині вказує на місце розташування розвитку тріщини вздовж осі симетрії.

Таким чином, приведені вище дані про експериментальне дослідження процесу прокатки багатошарової біметалічної композиції срібло-мідь-срібло, підтверджено ефективність та необхідність використання комп'ютерного моделювання. Однак при проведенні моделювання було помічено декілька недоліків цього методу відносно поставленої задачі та повного відтворення фізичного експерименту.

По перше, слід звернути увагу на неможливість моделювання у використаному програмному комплексі QForm процесу руйнації заготовки під час деформування. Це пов'язано із неможливістю порушення суцільності сітки моделі, яка деформується. Те місце, де може статися руйнація, можливо вирахувати лише з аналізу полів напружень, чим в вище описаному експерименті і скористалися.

По друге, слід зауважити, що використаний програмний комплекс не має змоги відтворювати з'єднання шарів металу. Цей процес в програмі відтворено за рахунок коефіцієнту тертя, і якщо в початкових параметрах вказати «-1» - то програма вважає шари металу вже з'єднано, а якщо використовувати звичайне значення коефіцієнту тертя – то шари металу не з'єднані і в процесі деформування може виникнути ситуація, коли один з шарів (або декілька) можуть вигинатись в сторону валків, хоча їх сумісна деформація в осередку

деформації буде проходити так само, наче вони з'єднані поперечно. При проведенні фізичного експерименту такої поведінки металу не спостерігалося. На рисунку 4 зображено один з невдалих кінцево-елементних розрахунків приведеного вище експерименту з прокатки багатшарової біметалічної композиції Ag-Cu-Ag.

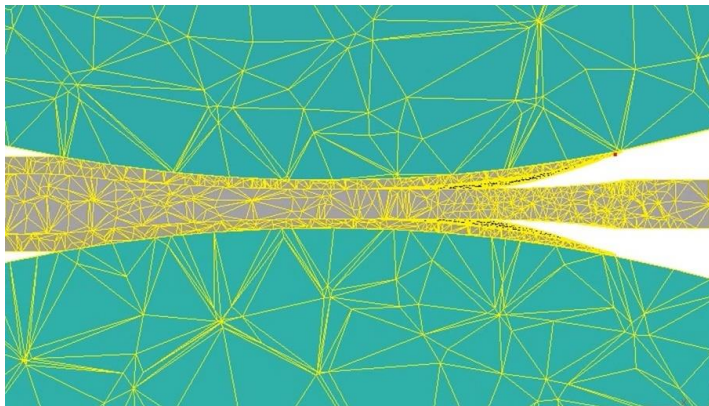


Рисунок 4 – Розширювання заготовки на виході з осередку деформації

Таким чином, існує необхідність розробки критерію з'єднання шарів металу під час деформування.

В роботі [57] розглянута проблема злипання та зварювання поверхонь контактуючих витків штаби при відпалюванні рулонів в печі під дією стискаючих напружень та температури з урахуванням шорсткості поверхні, та тривалості взаємодії слоїв. Авторами введена формула розрахунку питомої сили, необхідної для відриву витків одне від одного, що є аналогом розрахунку міцності з'єднання шарів металу при отриманні біметалевих виробів, при чому ці значення підлягають деякій класифікації, наприклад 3-9 Н/мм² – схоплення, 9-15 Н/мм² – злипання, 15 Н/мм² та більше – зварювання.

Таку ідею класифікації необхідно застосувати і до критерію з'єднання шарів металу під час деформування, однак із адаптацією під певні величини міцності з'єднання, оскільки вони будуть вищі за значення, приведені в роботі [57].

Дана робота не передбачає виконання експериментів та отримання даних, згідно яких можливе виведення певної формули залежності критерію з'єднання від вхідних факторів, або розрахунку певного чисельного значення критерію та створення відповідної класифікації. Це потребує додаткових подальших досліджень.

Перш за все, необхідно дати певне формулювання поняттю

«критерій з'єднання». Виходячи із аналізу технологічного процесу прокатки біметалевої штаби, та спираючись на аналіз сучасних розробок інших вчених, можна сформулювати наступне поняття критерію з'єднання: «Критерій з'єднання – це чисельна безрозмірна величина, яка визначає ступінь з'єднання металевих шарів між собою, та є співвідношенням напруження роз'єднання шарів до межі плинності шару, що має меншу межу плинності. Ця величина підлягає класифікації рівнів цього співвідношення за результатами випробувань». Межа плинності для розрахунку «критерію з'єднання» вибрана з наступної причини: з'єднання шарів металу можна вважати міцними, якщо місце з'єднання деформується так само, як метал менш міцного шару композиції.

Висновки

1. Проведений аналіз сучасних тенденцій виробництва та застосування біметалічних композиційних матеріалів (в тому числі багатошарових) показав, що кількість галузей, де застосовують біметали зростає з кожним роком, за рахунок того, що біметалічні композиційні матеріали можуть замінити звичайні вироби лише з одного матеріалу, при цьому або зберігши необхідні властивості, або навіть покращивши їх, а також в більшості випадків застосування – заощадити значну кількість більш дорогої сировини.

2. Дослідження технологій отримання композитів показало, що найбільш розповсюдженим, найбільш простим та ефективним методом отримання біметалів та багатошарових композиційних матеріалів є прокатка.

3. Аналіз теоретичних розрахунків показав, що на даний час існують методики розрахунку технологічного процесу прокатки біметалічних та багатошарових композитів, які базовані на методиках для монометалічної заготовки, та адаптовані під розрахунок сумісної деформації двох та більше металів. Також важливим питанням є визначення міцності з'єднання, яке на даний час оцінюється при розрахунку напружень в осередку деформації чи виходячи з експериментальних та статистичних даних сумарного ступеня деформації. При розрахунках в наш час доволі часто використовується комп'ютерне моделювання, яке дозволяє змоделювати процес сумісної деформації двох та більше шарів металу, однак воно не дозволяє розрахувати можливість з'єднання шарів.

4. Розроблено математичну модель отримання багатошарової біметалічної композиції Ag-Cu-Ag методом прокатки, яка дозволяє оцінити вплив параметрів процесу деформування на напружений стан шарів металу.

5. Визначено, що питанню розрахунку та оцінки з'єднання шарів приділено недостатньо уваги, тому сформульовано критерій з'єднання у вигляді співвідношення напруження роз'єднання шарів до межі плинності шару, що має меншу межу плинності. Показано доцільність створення класифікації діапазонів значень критерію для оцінки ступеню міцності з'єднання шарів біметалевих виробів.

Перелік посилань

1. Mansouri N., Eghbali B., Afrand M. Producing multi-layer composite of stainless steel/aluminum/copper by accumulative roll bonding (ARB) process. *J. Manuf. Process.* 2019, 46, 298–303.
2. Сварка. Введение в специальность / В. А. Фролов, В. В. Пешков., А. Б. Коломенский, В. А. Казаков. Воронеж, 2008. 384 с.
3. Голованенко С. А. Сварка прокаткой биметаллов. Москва : Металлургия, 1977. 160 с.
4. Авиация: Энциклопедия / Гл. ред. Г. П. Свищев. М. : Большая российская энциклопедия, 1994. – 736 с.
5. Промышленные алюминиевые сплавы : справ. изд. / Алиева С. Г., Альтман М. Б., Амбарцумян С. М. и др. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Металлургия, 1984. 528 с.
6. Коновалов О.Ф., Риженков О. А., Корольов В. П. Системний підхід до моніторингу корозії та захисту металевих конструкцій. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2004. № 5. С. 99-103.
7. Лихошва В. П., Шатрава А. П., Пеликан О. А. Современные способы производства биметаллических изделий. *Металл и лите Украины.* 2018. № 9-10 (304-305). С. 46-53.
8. Бэнкер Дж. Г. Промышленное применение сварки взрывом (Обзор). *Автоматическая сварка.* 2009. № 11. С. 49–53.
9. Математическое моделирование процессов обработки давлением. К. М. Иванов А. В. Лясников Л. А. Новиков Э. В. Юргенсон; под общ. ред. А. В. Лясникова. СПб. : ТОО «Инвентекс», 1997. 268 с.
10. Shaparev A. V., Savin I. Calculation of the Amount of the Reduction Required for the Formation of Compound Layers during Cold Rolling of Bimetals. *Materials Science Forum.* Vol. 870, Trans Tech Publications, Ltd., Sept. 2016. P. 328–333. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.870.328>.
11. Целиков А. И., Никитин Г. С., Рокотян С. Е. Теория продольной прокатки. М. : Металлургия, 1980. 320 с
12. Maleki H., Bagherzadeh S., Mollaei-Darjani B. et al. Analysis of Bonding Behavior and Critical Reduction of Two-Layer Strips in Clad Cold Rolling Process. *Journal of Materials Engineering and Performance.* 2013. Vol. 22. P. 917–925. <https://doi.org/10.1007/s11665-012-0342-9>
13. Vini M. H., Daneshmand S., Forooghi M. Roll Bonding Properties of Al/Cu Bimetallic Laminates Fabricated by the Roll Bonding Technique. *Technologies.* 2017. Vol. 5, 32. <https://doi.org/10.3390/technologies5020032>
15. Milner D. R., Vaidyanath L. R. Significance of surface preparation in cold pressure welding. *Met Constr Br Weld J.* 1960. Vol. 7. P. 1-6

16. Wright P. K., Snow D. A., Tay C. K. Interfacial conditions and bond strength in cold pressure welding by rolling. *Metals Technology*. 1978. Vol. 5. № 1. P. 24-31

14. Khan H. A., Asim K., Akram F., Hameed A., Khan A., Mansoor B. Roll Bonding Processes: State-of-the-Art and Future Perspectives. *Metals*. 2021, 1344. <https://doi.org/10.3390/met11091344>

References

1. Mansouri, H., Eghbali, B., & Afrand, M. (2019). Producing multi-layer composite of stainless steel/aluminum/copper by accumulative roll bonding (ARB) process. *J. Manuf. Process*, 46, 298–303

2. Frolov, V. A., Peshkov, V. V., Kolomenskiy, A. B., & Kazakov, V. A. (1977). *Svarka. Vvedenie v spetsialnost*.

3. Golovanenko, S. A. (1977). *Svarka prokatkoy bimetallov*. Metallurgiya

4. Svischev, G. P. (Ed). (1994). *Aviatsiya: Entsiklopediya*. Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya

5. Alieva, S. G., Altman, M. B., & Ambartsumyan, S. M. (1984). *Promyshlennyye alyuminiyevyye splavy*. Metallurgiya

6. Konovalov, O. F., Ryzhenkov, O. A., & Korolov, V. P. (2004). Systemnyi pidkhid do monitorynhu korozii ta zakhystu metalevykh konstrukttsii. *Fizyko-khimich na mekhanika materialiv*. (5), 99-103

7. Lihoshva, V. P., Shatrava, A. P., & Pelikan, O. A. (2018). Sovremennyye sposoby iproizvodstva bimetallicheskih izdeliy. *Metall i lite Ukrainy*, 9-10 (304-305), 46-53

8. Benker Dzh. G. (2009). Promyshlennoe primenenie svarki vzryivom (Obzor). *Avtomaticheskaya svarka*, (11), 49–53

9. Lyasnikov, A. V. (Ed.) (1997). *Matematicheskoe modelirovanie protsessov obrabotki davleniem*. TOO "Inventeks"

10. Shaparev, A. V., & Savin, I. (2016). Calculation of the Amount of the Reduction Required for the Formation of Compound Layers during Cold Rolling of Bimetals. *Materials Science Forum*, 870, Trans Tech Publications, Ltd., Sept. 2016, 328–333. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.870.328>

11. Tselikov, A. I., Nikitin, G. S., & Rokotyan, S. E. (1980). *Teoriya prodolnoy prokatki*. Metallurgiya

12. Maleki, H., Bagherzadeh, S., Mollaei-Dariani, B. et al. (2013). Analysis of Bonding Behavior and Critical Reduction of Two-Layer Strips in Clad Cold Rolling Process. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22, 917–925. <https://doi.org/10.1007/s11665-012-0342-9>.

13. Vini, M. H., Daneshmand, S., & Forooghi, M. (2017). Roll Bonding Properties of Al/Cu Bimetallic Laminates Fabricated by the Roll Bonding Technique. *Technologies*, 5, 32. <https://doi.org/10.3390/technologies5020032>

15. Milner, D. R., & Vaidyanath, L. R. (1960). Significance of surface preparation in cold pressure welding. *Met Constr Br Weld J.*, 7, 1-6

16. Wright, P. K., Snow, D. A., & Tay, C. K. (1978). Interfacial conditions and bond strength in cold pressure welding by rolling. *Metals Technology*, 5(1), 24-31

14. Khan, H. A., Asim, K., Akram, F., Hameed, A., Khan, A., & Mansoor, B. (2021). Roll Bonding Processes: State-of-the-Art and Future Perspectives. *Metals*, 11, 1344. <https://doi.org/10.3390/met11091344>

Ye. S. Klemeshov¹, Ph. D. (Tech.), Researcher, ORCID 0000-0001-6486-5319
I. Yu. Prykhodko¹, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-5651-8106
O. Ye. Merkulov¹, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-7867-0659

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

ANALYSIS OF THE PROBLEMS OF CREATING FLAT MULTILAYER BIMETALLIC COMPOSITIONS AND WAYS TO SOLVE THEM

Abstract. One of the trends in modern production is the search for materials capable of replacing steel, while gaining advantages and eliminating shortcomings in the characteristics and properties of products. Such material is bimetallic and multilayer composites. This work presents an analysis of the current state of developments in the production of bimetallic and multilayer composites. First of all, emphasis is placed on the manufacturing technologies of bimetallic composites, which are divided into two categories: with the use of deformation and without the use of deformation. It was concluded that rolling is the most widespread, simplest and effective method of obtaining bimetallic and multilayer composite materials. The analysis of modern research trends in the field of bimetal production showed that the majority of works are devoted to the calculation of the energy parameters of the rolling process, deformation parameters and the state of the surface of the samples for obtaining a joint, the mechanical properties of composite products with a diverse combination of steels and non-ferrous metals, the study of the structure of the samples in place with unity. Another important issue is the determination of the strength of the connection, which is currently estimated when calculating the stresses in the center of deformation or based on experimental and statistical data of the total degree of deformation. Nowadays, computer modeling is quite often used in calculations, which allows simulating the process of simultaneous deformation of two or more layers of metal, but it does not allow calculating the possibility of connecting the layers. In the work, a mathematical model for obtaining a multilayer bimetallic composition Ag-Cu-Ag by rolling method was developed, which allows to evaluate the influence of the parameters of the deformation process on the stress state of the metal layers. Based on the analysis of modern developments, it was determined that insufficient attention was paid to the issue of calculation and evaluation of the connection of layers, therefore, a criterion for the connection of metal layers was formulated. The expediency of creating a classification of ranges of criterion values for assessing the degree of strength of the connection of layers of bimetallic products is shown.

Key words: rolling, bimetal, composite, connection, mathematical model.

For citation: Klemeshov, Ye. S., Prykhodko, I. Yu., & Merkulov, O. Ye. (2024). Analysis of the problems of creating flat multilayer bimetallic compositions and ways to solve them. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 400-414. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-400-414>

*Стаття надійшла до редакції збірника 09.09.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)*