

РОЗРОБКА АНАЛІТИЧНИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ УМОВ З'ЄДНАННЯ ТА РОЗ'ЄДНАННЯ ШАРІВ МЕТАЛУ В БАГАТОШАРОВОМУ ПРОКАТІ

Анотація. Для забезпечення надійності та довговічності біметалічних та багатошарових стрічок або листів, отриманих методом прокатки, дуже важливо оцінювати міцність з'єднання на етапі їх створення. На сьогоднішній день існує безліч різних методів оцінки міцності з'єднання, а у сучасних дослідженнях часто використовують відразу кілька таких методів для контролю та оцінки міцності з'єднання отриманих зразків. Найбільш популярними методами оцінки є методи механічної перевірки міцності з'єднання, такі як випробування на зсув, випробування на відшаровування та в деяких випадках на згинання. Ці методи популярні, оскільки є простими, а в результаті випробувань, дослідники отримують певне кількісне значення, яке характеризує міцність з'єднання. Також існують методи мікроструктурної оцінки міцності з'єднання із застосуванням оптичної мікроскопії (ОМ), скануючої електронної мікроскопії (SEM) з EPC-аналізом, рентгенографії і вимірами твердості шарів на межі з'єднання. Практично всі перелічені методи оцінки стану поверхні з'єднання та міцності з'єднання належать до тих, що використовуються вже після проведення фізичних експериментів і таким чином збільшуються витрати часу та матеріалів на дослідження. У той же час FEM моделювання може бути використане як до, так і після проведення фізичних експериментів. Однак для цілей прогнозування можливості з'єднання та для оцінки міцності з'єднання шарів металу даний метод використовується вкрай рідко. Існуючі моделі розрахунку процесу з'єднання шарів металу враховують безліч змінних, які, як правило, отримані суто емпірично та адаптовані лише під певні параметри процесу прокатки для отримання досить точних результатів, однак, в той же час, вони є досить громіздкими та складними, не універсальними у застосуванні, що обмежує їх можливість для розрахунку різних комбінацій шарів та матеріалів при створенні технологій. Таким чином, актуальною задачею є розробка більш універсальних методів розрахунку для оцінки міцності з'єднання шарів у біметалічному та багатошаровому прокаті при застосуванні комп'ютерних програм FEM моделювання. На основі багатьох досліджень, в області з'єднання шарів металу

© Є. С. Клемешов, І. Ю. Приходько, 2025

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

при прокатці, розроблено критерій з'єднання шарів металу та методику розрахунку міцності з'єднання шарів металу під час холодної прокатки. Розроблену методику можливо реалізувати із застосуванням комп'ютерного моделювання в програмі QForm UK за допомогою вбудованого в програму інструменту, такого як «підпрограми користувача».

Ключові слова: біметал, прокатка, міцність з'єднання, метод оцінки, комп'ютерне моделювання.

Посилання для цитування: Клемешов Є. С., Приходько І. Ю. Розробка аналітичних методів оцінки умов з'єднання та роз'єднання шарів металу в багатошаровому прокаті. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2025. Вип. 39. С. 361-372. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-23>

Вступ. При прокатці біметалічних штаб важливо оцінювати міцність з'єднання для забезпечення надійності та довговічності матеріалу. Існує кілька ключових методів оцінки, що включають механічні випробування, мікроструктурний аналіз та чисельне моделювання. Зазвичай, механічні випробування включають в себе тестування на розтягування спеціально підготовлених зразків, на яких випробовується міцність з'єднання двох шарів. Найбільш популярними методами є метод зсуву та метод відшарування. Мікроструктурний аналіз включає в себе використання обладнання для мікроскопічних досліджень, апаратів рентгенографічного аналізу та твердомірів. Чисельне моделювання використовується на багато рідше, ніж інші методи, оскільки досліджень в області прогнозування з'єднання шарів та оцінки умов з'єднання та роз'єднання шарів дуже мало. Тому, перш за все, потрібно зробити аналіз стану цієї проблеми на сьогоднішній день та розглянути основні напрямки досліджень, використані методи оцінки якості з'єднання та результати, які отримано в області виготовлення багатошарових композитів.

Прикладом сучасних розробок є публікація [1], у якій наведено дослідження із використанням кількох методів оцінки міцності з'єднання (електронна мікроскопія та ЕРС-аналіз, визначення твердості шарів та місця з'єднання, а також випробування на відшарування), отриманого при різних рівнях деформації. При деформації 0,26 спостерігалися великі порожнечі, з'єднані тонкими містками, що характерно для початкової стадії з'єднання. Зі збільшенням деформації до 0,33 кількість і регулярність створення містків збільшилися, утворюючи міцніше з'єднання. При деформації 0,4 поверхня з'єднання була гладкою, що вказує на міцне з'єднання. Випробування на відшарування показали, що середня міцність з'єднання склала 12,6 Н/мм при деформації 0,26 та 18,4 Н/мм при деформації 0,33. При

деформації 0,4 стався розрив алюмінієвого шару із навантаженням 39 Н/мм, що відповідає межі міцності на розрив сплаву 1050А.

Метою дослідження [2] була розробка біметалічного профілю зі сталі марки 35# плакованою легованою сталлю 316L для задоволення стандартів пластичності та міцності. Прокатка велася на 13 прокатних клітях при 1150 °С із застосуванням вакуумної технології. Крім того, механічні властивості та мікроструктура композиту були проаналізовані у кількох варіантах. Твердомір та машина для випробування на розтягування використовувалися для вимірювання механічних властивостей біметалічних зразків у макромасштабі за допомогою випробувань на твердість, розтягування та зсув. ОМ, SEM та ЕРМА використовувалися для спостереження металографічної мікроструктури, сканування тріщин та дифузії елементів зразків у мезомасштабі, а ТЕМ використовувався для спостереження мікроструктурної морфології шарів біметалу.

У дослідженні [3] вивчалася симетрична прокатка 3D-сендвіч-листів з термо-пружно-пластичною моделлю з урахуванням пружного ролика та теплопередачі. У цьому дослідженні використовували комбіновану заготовку з алюмінію та міді. Використано чисельний метод моделювання симетричної гарячої прокатки алюмінієво-мідних стрічок за умови гладкої та рівної поверхні ролика. Вперше вводиться критерій ковзання, для визначення стану напружень зсуву на межі шарів, для вибору кращого ступеня обтиснення та запобігання ковзання, що може призвести до пошкодження дотичних поверхонь. Регулюючи ступінь деформації можна отримати середню напругу зсуву нижче, ніж відповідна середня напруга зсуву плинності на поверхні з'єднання алюмінієвого та мідного шару. У цій статті були змодельовані ступені обтиснення 6%, 12,5% і 14,17%, а результати вказують на те, що найбільш оптимальним ступенем деформації, при якій не спостерігається проковзування, є трохи нижче 12,75%.

Досить широке дослідження проведено авторами [4]. У публікації подано огляд на існуючі технології з'єднання двох металів. Цей огляд включає широкий перелік різних операцій, що включають з'єднання металів в рідкому стані, нанесення рідкого розплаву на поверхню і кілька методів з'єднання двох тіл у твердому стані, зокрема методом прокатки. Саме цьому методу надано основну увагу та розглянуто різні методи вивчення процесу з'єднання металів, а також визначено, що існує значна різниця між механізмами з'єднання металів у холодному та гарячому стані. Так, у холодному стані метали мають плівку оксидів і забруднень на поверхні, які перешкоджають з'єднанню двох шарів металу. При деформації ці плівки руйнуються і в місцях руйнування з'єднуються два шари, таким чином підкреслюючи, що ступінь

деформації при холодній прокатці є основним фактором, що впливає на міцність з'єднання. При гарячій деформації ступені впливу плівок не такі значні, зважаючи на набагато більший вплив температури на сам процес. При цьому включаються механізми дислокаційної та атомарної взаємодії шарів і тому при гарячій деформації часто виникають інтерметалідні шари на межі з'єднання двох металів, таким чином розмиваючи межу з'єднання, але збільшуючи міцність з'єднання. Далі розглянемо декілька розрахункових моделей та основних факторів впливу на міцність з'єднання.

Спочатку Бей [5] визначив, що розширення поверхні металу при прокатці корелюється зі значеннями обтискання і при досягненні його порогового значення відбувається з'єднання металу. Таким чином, розширення поверхні може бути індексом, що відображає стан з'єднання. Цей параметр можна додати до тих, що є універсальними для будь-якого процесу прокатки, незалежно від комбінації шарів металу, їх товщини та матеріалу шарів. Також до цієї категорії можна віднести сумарний ступінь деформації, або ступінь деформації за прохід, який так само має вплив на міцність з'єднання.

На основі дослідження Конрада та Рейса [6] міцність зчеплення шарів в ідеальних умовах дорівнює прикладеному тиску. Однак у реальному процесі прокатки існують два типи поверхневої плівки: покривний шар та забруднення на поверхні. З цього можна зробити висновок, що одним із параметрів впливу на процес з'єднання шарів є товщина оксидної плівки для холодної деформації та товщина шару окалини для гарячої деформації.

Як стверджують Бамбах та ін [7], необхідна змінна, яка могла б відображати стан поверхні. По-перше, максимальна міцність з'єднання має дорівнювати межі плинності з'єднання, що виникає в тріщинах. По-друге, максимальна міцність з'єднання дорівнює межі плинності слабшого матеріалу.

Існує також модель Купера-Олвуда [8], яка враховує зсувну напругу в процесах, наприклад, асиметричної прокатки. Ця модель може правильно передбачити тенденції, але для більш високих температур вона занижує міцність з'єднання, оскільки не враховується механізм дифузії.

За винятком наведених вище теорій, деякі дослідники використовували інші критерії для прогнозування з'єднання шарів металу. Чжан та інші [9] запропонували критерій з'єднання для процесу гарячої прокатки, в якому деформація повинна бути більше критичного значення, при якому відбувається з'єднання, а міцність з'єднання (σ_{form}) повинна бути більшою або дорівнювати критичній міцності з'єднання.

До інших методів обчислення процесів з'єднання та роз'єднання

шарів металу можна віднести метод аналізу межі формозміни (FLD – Forming Limit Diagram). Цей метод застосовується з метою оцінки стійкості з'єднання до пластичної деформації при прокатці. FLD показує, за яких умов можливе руйнування з'єднання. Як приклад, використання цього методу у дослідженнях, можна навести роботу Б.С. Абдулаєвої та ін. [10]. У роботі наведено оцінку та аналіз межі формозміни для біметалічних Al/BN/Cu листів, з'єднаних методом накопичувальної прокатки.

Також до інших методів розрахунку можна віднести термомеханічне моделювання з'єднання під час прокатки. Цей метод дозволяє враховувати вплив температури на з'єднання при прокатці. Він особливо важливий при гарячій прокатці, коли дифузійні процеси впливають на якість з'єднання. Серед прикладів застосування цього методу можна навести дослідження [11]. У моделюванні з'єднання титану та сталі методом гарячої прокатки використовується температуро-залежний аналіз механічних властивостей, щоб визначити, за яких температур досягається найкраще з'єднання.

Ще одним методом є розрахунок термодинамічних параметрів з'єднання. При прокатці біметалів важливо враховувати процеси дифузії на межі з'єднання, утворення нових фаз та зміни структури. Як приклад досліджень, із застосуванням методів розрахунку термодинамічних параметрів з'єднання, можна навести дослідження [12]. У цій роботі проведено дослідження утворення сполуки алюмінію та міді методом гарячої прокатки. Результати роботи показали, що утворення інтерметалідів Al_2Cu та Al_4Cu_9 знижує пластичність з'єднання.

Для розрахунку напружено-деформованого стану металу в осередку деформації можна використовувати такі методики:

1) Метод ліній ковзання (для плоскої деформації): дає точне рішення для ідеально-пластичного матеріалу. Дозволяє знайти розподіл нормальних (σ_n) та дотичних (τ) напружень на межі розділу шарів.

2) Енергетичні методи (наприклад, метод віртуальних робіт): менш точний, але простіше для інженерних розрахунків. Дозволяє оцінити середні контактні тиски.

3) Скінченно-елементне моделювання (МСЕ): на сьогодні найпотужніший і найточніший інструмент. Дозволяє врахувати реальні властивості матеріалів, температурні поля, тертя та отримати повну картину напружень у будь-якій точці заготовки, включаючи межу розділу шарів.

У всіх літературних джерелах, які були проаналізовані авторами цієї роботи, не зазначено розрахункових методів із використанням комп'ютерного моделювання, для отримання конкретного значення напружень роз'єднання шарів або значень міцності з'єднання. Усі

розглянути методи оцінки ефективності з'єднання нерозривно пов'язані із емпіричними даними і в своїй основі мають порівняння або співвідношення вже отриманої емпірично величини напружень роз'єднання із параметрами процесу прокатки або механічними властивостями металів. Одним із напрямків сучасних розробок також є розробка методів розрахунку критерію з'єднання, тобто розрахунок деякої змінної, або декількох змінних, які вказують, що під час деформування відбулося з'єднання або не відбулося. Такі методи ґрунтуються на аналізі умов, за яких відбувається порушення зв'язку між шарами (розшарування чи непрокат).

Мета дослідження. Основною метою дослідження є аналіз літературних джерел для визначення основних емпіричних та розрахункових методів для оцінки якості з'єднання шарів металу під час прокатки, а також визначення шляхів реалізації розрахункових методів у комп'ютерному моделюванні та розробка методу обчислення міцності з'єднання шарів металу при прокатці.

Результати дослідження. На практиці, як показав аналіз сучасних досліджень у галузі з'єднання шарів металу, часто використовують метод порівняння меж плинності, використовують MCE (наприклад, QForm UK, Forge 3D, ANSYS, ABAQUS, DEFORM, COMSOL Multiphysics), а також аналітичну оцінку на основі середніх тисків. Повний аналітичний розрахунок за методом ліній ковзання дуже громіздкий. Також можна використовувати формулу для середнього контактного тиску при прокатці (наприклад, формулу Зібеля-Томлена) для кожного шару окремо, а потім розглядати їх взаємодію через умову рівноваги на кордоні. Але найоптимальнішим методом все ж таки є MCE, який де-факто є промисловим стандартом для вирішення таких завдань.

Тепер розглянемо фізичну суть такого явища як з'єднання шарів металу. Воно полягає в тому, що при прокатці біметалу або багатшарового композиту в осередку деформації на контактні між шарами діють два основні фактори. Перший - це нормальний тиск (P), тобто зусилля, яке "притискає" шари один до одного. Нормальний тиск прагне збільшити площу контакту та створити новий зв'язок між шарами (за рахунок механічного "вдавлювання" нерівностей та руйнування оксидних плівок). Іншим основним фактором є дотичні напруги (τ), які виникають через різницю характеру течії шарів (різна пластичність, міцність, коефіцієнт тертя). Ці напруги прагнуть зрушити шари один відносно іншого, що може призвести до руйнування зв'язків, які тільки почали формуватися або вже сформовані.

Умову проковзування шарів один відносно іншого в такому випадку можна записати так:

$$\tau_{xz} < \sigma_s, \quad (1)$$

де τ_{xz} – діючі зсувні напруження у площі розділу шарів металу, σ_s – межа текучості більш м'якого металу.

Таким чином, якщо ця нерівність виконується - ковзання шарів металу один відносно одного не відбувається та можливе утворення зв'язку шарів металу [3]. Треба зауважити, що застосування цього критерію справедливе лише тоді, коли у парі металів, які з'єднують, існує суттєва розбіжність у межі плинності.

Як зазначили Конрад і Рейс [6] міцність з'єднання в ідеальних умовах дорівнює прикладеному тиску, однак у процесах прокатки, в переважній більшості випадків, на контакт шарів металу присутні бруд та оксидні плівки. Для того, щоб відбулося з'єднання шарів - необхідно щоб величина нормального тиску (P) перевищила критичний поріг ($P_{кр}$), що дозволить зруйнувати оксидну плівку і крізь ці тріщини чистий метал буде вичавлюватися та вільно контактувати з іншим шаром композиту. Розглянемо прості методи, що часто використовуються в інженерній практиці [13]. Узагальнивши ці методи, розрахунок критичного нормального тиску можна записати так:

$$P_{кр} = k \cdot (\sigma_T + \sigma_{пл}), \quad (2)$$

де $P_{кр}$ – критичний тиск; k – коефіцієнт запасу. Зазвичай знаходиться у діапазоні 1.5 – 2.5. Він враховує неідеальність умов (нерівномірність деформації, коливання властивостей та товщини плівки). На практиці часто приймають рівним 2; σ_T – межа плинності більш м'якого шару в умовах процесу (з урахуванням температури, швидкості деформації); $\sigma_{пл}$ - опір деформації поверхневої плівки (наприклад, оксидної плівки).

Опір деформації поверхневої плівки можна взяти з довідників, якщо відомий її точний хімічний склад, хоча навіть у такому разі можуть виникнути труднощі з пошуком. Тому найчастіше значення опору деформації оксидної плівки для спрощення розрахунків приймають 2-3 кратним межі плинності більш м'якого шару. Підставивши значення у рівняння (2), можна побачити, що значення $P_{кр}$ можуть перебувати в інтервалі 4,5..10 σ_T . У літературі це значення часто приймають рівним 3..5 σ_T . Таким чином, якщо розрахунковий нормальний тиск в осередку деформації $P > P_{кр}$, то з'єднання буде міцним, а якщо $P < P_{кр}$, висока ймовірність розшарування заготовки вже на виході з валків і можна припустити, що з'єднання не сталося зовсім. Такий критерій з'єднання простіше за все реалізувати у комп'ютерному моделюванні, однак він має невелику точність, оскільки залежить від заданого параметру $P_{кр}$, та не дозволяє розрахувати міцність з'єднання, а лише показує, відбулося з'єднання шарів металу чи ні.

Методики та підходи до визначення міцності з'єднання сильно відрізняються один від одного [7, 14]. Існують складні моделі розрахунку [15], що враховують безліч суто експериментальних величин, отриманих шляхом мікроскопічного дослідження місця з'єднання шарів та вимірів твердості. Такі моделі вкрай складні в адаптації та реалізації за допомогою комп'ютерного моделювання, однак спробуємо зробити спрощену модель такого розрахунку для реалізації його у програмі QForm UK. Слід зазначити, що дана модель придатна для холодної деформації, де діють лише механізми руйнації оксидних плівок та склеювання ювенільних поверхонь і відсутні механізми дифузії, властиві для гарячого процесу з'єднання шарів металу.

Перш за все необхідно розібратися, коли починається руйнація оксидної плівки металу. При вході металу в зону деформації, він проходить деяку дистанцію до того моменту, коли плівка вичерпує свій ресурс пластичності та руйнується. Методи розрахунку та відповідні залежності приведені в книзі [16]. Для розрахунку ступеню деформації зсуву до руйнації використовується рівняння (3).

$$\Lambda_p = \frac{0,25}{1+0,25 k} \times \frac{1}{1+0,11 H}, \quad (3)$$

де Λ_p – ступінь деформації зсуву до момента руйнації k – показник напруженого стану, H – товщина плівки металу у мкм.

Показник напруженого стану k – є співвідношенням середніх напружень до інтенсивності дотичних напружень і відображає напружений стан у певній точці поверхні. Товщина плівки H вимірюється експериментально.

Розрахувавши Λ_p можна визначити висоту перерізу в осередку деформації, де починається руйнація плівки із наступного рівняння:

$$\Lambda_p = 2 \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (4)$$

де h_0 – початкова товщина полоси h_1 – товщина полоси у момент руйнації оксидної плівки.

Визначивши h_1 можливо також розрахувати відносний ступінь деформації, при якому починається руйнація плівки.

Далі необхідно розрахувати довжину осередку деформації (l_d) за відомими формулами, з якої, з урахуванням h_1 , можна визначити положення перерізу по довжині від початку осередку деформації. Це необхідно для розрахунку довжини осередку деформації (l_p), на якому буде відбуватися так зване «оновлення» поверхні металу, за рахунок утворення тріщин в оксидній плівці, їх розширення та контакт ювенільних поверхонь, які будуть з'єднуватися між собою. Площу

ювенільних поверхонь можливо вирахувати, якщо припустити, що осередок деформації має форму трапеції у площині контакту шарів металу, основа якої більша за верхню частину на значення поширення металу під час деформування (Δb), а знаючи довжину осередку, де відбувається руйнування плівок (l_p) – отримуємо рівнобедрений трикутник з висотою l_p та довжиною основи Δb . Поширення металу при прокатці можна розрахувати за формулою Целікова:

$$\Delta b = 1,15 \cdot \left(\frac{\Delta h}{2h_0}\right) \cdot \sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2f}, \quad (5)$$

де Δb – поширення металу при прокатці, Δh – абсолютне обтиснення, h_0 – початкова товщина композиту, R – радіус валка, f – коефіцієнт тертя.

Периметр (S_1) та площа (S_2) трикутника розраховуються за відомими формулами. Ювенільні поверхні представляють із себе чистий метал, а як було сказано раніше, в такому випадку, міцність з'єднання таких поверхонь (σ_c) буде дорівнювати прикладеному тиску. Прикладений тиск (P_z), який вичавлює метал крізь тріщини розраховується наступним чином:

$$P_z = 2 \cdot S_1 \cdot \sigma_T \cdot H, \quad (6)$$

де σ_T – межа плинності більш м'якого шару, H – товщина оксидної плівки.

Відповідно міцність з'єднання буде дорівнювати:

$$\sigma_c = \frac{P_z}{S_2}, \quad (7)$$

Розраховане значення не буде повністю відповідати дійсним експериментальним значенням, оскільки при розробці методу зроблено деякі припущення, однак, незважаючи на це, дозволить визначити, відбувається зчеплення шарів чи ні, а також приблизно оцінити міцність з'єднання шарів композиту. Окрім цього, розроблену методику можливо реалізувати у комп'ютерному моделюванні в програмі QForm UK за допомогою вбудованого в програму інструменту, такого як «підпрограми користувача».

Висновки

1. На сьогоднішній день існує безліч різних методів дослідження процесу з'єднання шарів металу та методів оцінки міцності з'єднання. У дослідженнях часто використовують відразу кілька методів контролю та оцінки міцності з'єднання. Можуть бути застосовані методи механічної оцінки міцності з'єднання (випробування на зсув або на відшаровування), метод мікроструктурної оцінки міцності з'єднання із

застосуванням оптичної мікроскопії (ОМ), скануючої електронної мікроскопії (SEM) з ЕРС-аналізом, рентгенографії і вимірами твердості шарів на межі з'єднання. Практично всі перелічені методи оцінки стану та міцності з'єднання належать до тих, що використовуються вже після проведення фізичних експериментів і таким чином збільшуються витрати часу та матеріалів на дослідження. У той же час FEM моделювання може бути використане як до, так і після проведення фізичних експериментів. Однак для цілей прогнозування можливості з'єднання та для оцінки якості з'єднання шарів даний метод використовується вкрай рідко.

2. Вже зараз існують моделі розрахунку процесу з'єднання шарів металу. Вони враховують безліч параметрів з'єднання для отримання досить точних результатів, однак, в той же час, вони є досить громіздкими та складними у застосуванні, що обмежує їх можливості для розрахунку різних комбінацій шарів та матеріалів. Таким чином, розробка більш універсальних методів розрахунку та оцінки з'єднання шарів у багатошаровому прокаті, із застосуванням комп'ютерних програм FEM моделювання, є актуальною.

3. На основі багатьох досліджень в області з'єднання шарів металу при прокатці розроблено критерій з'єднання шарів металу та методику розрахунку міцності з'єднання шарів металу під час холодної прокатки. Розроблену методику можливо реалізувати у комп'ютерному моделюванні в програмі QForm UK за допомогою вбудованого в програму інструменту, такого як «підпрограми користувача».

Перелік посилань / References

1. Koshmin, A., Zinoviev, A., Cherkasov, S., Mahmoud Alhaj Ali, A., Tsydenov, K., & Churyumov, A. (2024). Finite Element Modeling and Experimental Verification of a New Aluminum Al-2%Cu-2%Mn Alloy Hot Cladding by Flat Rolling. *Metals*, 14(8), 852. <https://doi.org/10.3390/met14080852>.
2. Zhuang, Zecheng & Zeng, Lei & Lu, Weiping & Qian, Xuehai & Li, Zhen & Tan, Jianping & Xiang, Yong. (2024). Manufacturing of high strength bimetallic section steel with hot-rolling process. *Progress in Natural Science: Materials International*. 34. 10.1016/j.pnsc.2024.10.003.
3. Lin, Zone-Ching & Huang, Tang-Guo. (2000). Different degree of reduction and sliding phenomenon study for three-dimensional hot rolling with sandwich flat strip. *International Journal of Mechanical Sciences - INT J MECH SCI*. 42. 1983-2012. 10.1016/S0020-7403(99)00067-3.
4. Li, Zixuan & Rezaei, Shahed & Wang, Tao & Han, Jianchao & Shu, Xue & Pater, Zbigniew & Huang, Qingxue. (2022). Recent advances and trends in roll bonding process and bonding model: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*. 36. 10.1016/j.cja.2022.07.004.
5. Bay, N. (1983). Mechanisms producing metallic bonds in cold welding. *Welding J*, 137.
6. Conrad, H., & Rice, L. (1970). The cohesion of previously fractured Fcc metals

in ultrahigh vacuum. *Metallurgical Transactions*, 1(11), 3019-3029.

7. Bambach, Markus & Pietryga, M. & Mikloweit, A. & Hirt, Gerhard. (2014). A finite element framework for the evolution of bond strength in joining-by-forming processes. *Journal of Materials Processing Technology*. 214. 2156–2168. 10.1016/j.jmatprotec.2014.03.015.

8. Cooper, D. R., & Allwood, J. M. (2014). The influence of deformation conditions in solid-state aluminium welding processes on the resulting weld strength. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2576-2592.

9. Zhang, X. P., Yang, T. H., Castagne, S., Gu, C. F., & Wang, J. T. (2011). Proposal of bond criterion for hot roll bonding and its application. *Materials & Design*, 32(4), 2239-2245.

10. Abdullaeva, Barno & Kareem, A.K. & Rachchh, Nikunj & Koka, Nisar & Dehnavi, H.N.. (2024). Evolution of fracture toughness, forming and creep properties of Al/BN/Cu bimetal composite strips fabricated via ARB method. *Structures*. 69. 107483. 10.1016/j.istruc.2024.107483.

11. Wei, Z., Huang, P., Su, X., Gao, Q., Feng, Z., Peng, L., Li, J., & Zu, G. (2025). Effect of bell annealing on the interface microstructure and mechanical properties of titanium/steel composite plates prepared by hot rolling. *Materials Science and Engineering: A*, 919, 147485. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147485>.

12. Basem, Ali & Jasim, Dheyaa & Bansal, Pooja & Qasim, Maytham & Brisset, B.. (2024). Creep properties of bimetal Al/SiC/Cu composites fabricated via accumulative roll bonding process Al/SiC/Cu. *Journal of Central South University*. 31. 3807-3818. 10.1007/s11771-024-5799-9.

13. Messler, R. W. (2004). *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. Wiley-VCH.

14. Zhang, W., & Bay, N. (1996). A numerical model for cold welding of metals. *C I R P Annals*, 45(1), 215-220. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63050-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63050-9).

15. 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. In *Materials Science Forum* (Vol. 870, pp. 328–333). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.870.328>.

16. Kolmogorov V. L. (1977). *The ductility and fracture*. Moscow: Metallurgy.

Ye. S. Klemeshov¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-6486-5319

I. Yu. Prykhodko¹, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-5651-8106

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

* *Corresponding author: klemeshov.evgen@gmail.com*

DEVELOPMENT OF ANALYTICAL METHODS FOR ASSESSING THE CONDITIONS OF BONDING AND DEBONDING OF METAL LAYERS IN MULTILAYER ROLLING

Abstract. To ensure the reliability and durability of bimetallic and multilayer strips or sheets produced by rolling, it is crucial to evaluate the bond strength during their manufacturing stage. To date, there are numerous different methods for assessing bond strength, and modern research often employs several such methods

simultaneously to control and evaluate the bond strength of the obtained samples. The most popular assessment methods are those involving mechanical testing of bond strength, such as shear tests, peel tests, and in some cases, bending tests. These methods are popular because they are simple, and as a result of the tests, researchers obtain a specific quantitative value that characterizes the bond strength. There are also methods for microstructural evaluation of bond strength using optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) with EDS analysis, radiography, and hardness measurements of the layers at the bonding interface. Almost all the listed methods for assessing the condition of the bonding interface and the bond strength itself are used after physical experiments have been conducted, thus increasing the time and material costs of research. At the same time, FEM modeling can be used both before and after physical experiments. However, this method is very rarely used for predicting the possibility of bonding and for assessing the bond strength of metal layers. Existing models for calculating the metal layer bonding process take into account numerous variables, which are typically obtained purely empirically and are adapted only for specific parameters of the rolling process to achieve fairly accurate results. However, they are also quite cumbersome, complex, and not universal in application, which limits their capability for calculating various layer and material combinations in technology development. Thus, the relevant task is the development of more universal calculation methods for assessing the bond strength of layers in bimetallic and multilayer rolling using FEM simulation software. Based on numerous studies in the field of metal layer bonding during rolling, a criterion for metal layer bonding and a methodology for calculating the bond strength of metal layers during cold rolling have been developed. The developed methodology can be implemented using computer simulation in the QForm UK software by utilizing a built-in tool such as "user subroutines."

Keywords: bimetal, rolling, bond strength, assessment method, computer simulation.

Citation: Klemeshov, Ye. S., & Prykhodko, I. Yu. (2025). Development of analytical methods for assessing the conditions of bonding and debonding of metal layers in multilayer rolling. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, 39, 361-372. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-23>

Рукопис надійшов до редакції / Received 30.06.2025

Рекомендовано до друку / Accepted 21.10.2025