

Миронова Т.М., Ашкелянєць А.В., Бондарев С.В., Губа Р.М.

Формування структури в багатошарових поковках з вуглецевої і корозійностійкої сталей та мідних сплавів

Myronova T.M., Ashkelianets A.V., Bondarev S.V., Guba R.M.

Structure formation in multi-layer forgings from carbon and corrosion-resistant steel and copper alloys

Розроблення технології отримання багатошарових поковок із різних сплавів сприяє економії дефіцитних матеріалів таких як хромонікелеві корозійностійкі сталі. Властивості багатошарових виробів поєднують в собі міцність основного шару з конструкційної сталі та підвищену корозійну стійкість високолегованого шару, що безпосередньо контактує з робочим середовищем. Багатошарові матеріали застосовуються в машинобудуванні, промисловості, сільському господарстві. В якості різального інструменту застосовується «ламінатна сталь» або ламінат. Ламінат являє собою центральний лист (пластину), покритий з обох сторін листами сталі іншої марки. За рахунок різних властивостей центрального листа і обкладок клинок з ламінату отримує поліпшені характеристики. Одним із найбільш поширених способів виготовлення таких матеріалів є гаряче деформування. Найбільш важливою проблемою при виготовленні багатошарових сталевих композитів є забезпечення якісного зварювання між шарами різних сталей. Для розроблення режиму кування багатошарових заготовок в роботі здійснювали комп'ютерне моделювання у програмі QForm. Враховуючи отримані результати моделювання визначено режими нагріву та проведено кування композитних пакетів із різних сталей. Деформування експериментальних зразків здійснювали протягуванням. Після розрахунку параметрів кування прийнято два проходи для деформації заготовки з сумарним уковом 2,56. Для багатошарових пакетів, що підлягали куванню використовували наступні сплави: для центрального шару сталі марок ШХ15, Ст.3, для обкладок сталь AISI321, що є аналогом сталі 08X18H10T, для проміжних шарів – мідь марки М1 та латунь марки Л63. Досліджено особливості мікроструктури в зонах контактного зварювання шарів латунь – вуглецева сталь і латунь сталь AISI321, мідь – вуглецева сталь, мідь – сталь AISI321, мідь – сталь ШХ15. В якості проміжного шару для кращого зварювання сталевих шарів між собою в процесі кування, а також для запобігання дифузії вуглецю та легуючих елементів, доречно рекомендувати застосування пластини міді М1.

Ключові слова: кування, багатошарові заготовки, моделювання, вуглецева сталь, хромонікелева сталь, мідні сплави, зварювання.

The development of the technology for obtaining multi-layer forgings from various alloys contributes to the saving of scarce materials such as chrome-nickel corrosion-resistant steels. The properties of multilayer products combine the strength of the main layer of structural steel and the increased corrosion resistance of the highly alloyed layer, which is in direct contact with the working environment. Multi-layer materials are used in various industries. Laminated steel or laminate is used as a different tool. Laminate is a central sheet (plate), covered on both sides with sheets of steel of a different grade. The laminate tool has improved characteristics, it combines the properties of the central sheet and covers. One of the most common methods of manufacturing such materials is hot deformation. The most important problem in the production of multilayer steel composites is to ensure high-quality welding between layers of different steels. To develop the mode of forging multilayer blanks, computer modeling was carried out in the QForm program. After obtaining the simulation results, the heating modes were determined and the forging of composite packages from different steels was carried out. Deformation of the experimental samples was carried out by forging broach. After calculating the forging parameters, two passes were taken to deform the workpiece with a total degree of forging of 2.56. The following alloys were used for multilayer packages to be forged: for the central layer of ShH15, St 3 steel, for the covers AISI321 steel, which is an analogue of 08X18H10T steel, for intermediate layers - M1 copper and L63 brass. The peculiarities of the microstructure in the zones of contact welding of layers of brass - carbon steel and brass steel AISI321, copper - carbon steel, copper - steel AISI321, copper steel ShH15 were studied. As an intermediate layer for better welding of steel layers to each other in the forging process, as well as to prevent the diffusion of carbon and alloying elements, it is appropriate to recommend the use of M1 copper plate.

Key words: forging, multilayer blanks, modeling, carbon steel, chrome-nickel steel, copper alloys, welding.

Вступ. Актуальність. У сучасній техніці переважає більшість металевих конструкцій різного призначення при експлуатації відчувають одночасний вплив механічних навантажень і зовнішнього агресивного середовища. Для особливо відповідальних металомістких конструкцій, деталей та інструменту, де потрібне забезпечення високого рівня міцності і опору різним видам

корозійних руйнувань, а іноді і абразивного зносу, стає неможливим підібрати сталь або сплав, який поєднує в собі всі необхідні якості. [1-4]. З метою економії дорогих і дефіцитних металів або як матеріали із спеціальними властивостями застосовуються біметали — металеві вироби (пластинки, листи, стрічки, дрот і т. ін.), що складаються з двох міцно з'єднаних між собою різнородних металів або

© Миронова Т.М. – д.т.н., проф. УДУНТ
Ашкелянєць А.В. – к.т.н., доц., НТУ «ХПІ», м.Харків

Бондарев С.В. - УДУНТ
Губа Р.М. – аспірант УДУНТ

© Myronova T. – d.t.s., profssor, USUST
Ashkelianets A. – c.t.s., docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv
Bondarev S. – USUST
Guba R. – PhD student at USUST



This is an Open Access article under the CC BY 4.0 license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

сплавів. Матеріали з об'єднаними характеристиками використовуються повсюдно, підвищуючи ефективність робочого процесу або забезпечуючи інші додаткові переваги. У сучасній металургійній промисловості біметал виробляють у різний спосіб: нанесенням на поверхню покриття, наплавленням одного металу на інший, пластичним деформуванням, здебільшого вальцюванням.

При цьому важливо розуміти, що створення біметалу пов'язане з певними витратами, а отже, доцільність його використання має бути попередньо економічно обґрунтованою.

Враховуючи, що в умовах промислового виробництва в багатьох випадках необхідним є застосування деформування методом кування, дослідження особливостей і розроблення технології для отримання багатошарових поковок є актуальною задачею сучасного матеріалознавства.

Аналіз літературних даних. Розрізняють біметали двох- і багатошарові. Біметали відзначаються рідкісним поєднанням властивостей вихідних металевих матеріалів, наприклад високої міцності зі значною стійкістю проти спрацювання. Біметали застосовують, в основному, як корозійностійкі, антифрикційні, термо- та зносостійкі матеріали.

Одним з головних резервних напрямів економії дефіцитних високолегованих сталей є використання двошарових сталей. Дана група сталей включає в собі дві особливі якості конструкційного матеріалу: міцність основного слою та спеціальні особливості високолегованого контактного слою (в якості антикорозійного шару використовують аустенітні сталі марок 08X18H10T, 08X17H13M3T та ін.), який безпосередньо контактує з робочим середовищем. Завдяки цьому двошарова група сталей характеризується сукупністю властивостей, які забезпечують корозійну стійкість при високій міцності, зносостійкість, ударній в'язкості та ін. [4]. Виготовлення таких матеріалів здійснюється в процесі гарячого деформування, а саме: вальцювання (наприклад, плакування листів і плит), пресування (плакування труб), а також методом зварювання вибухом. Спосіб плакування полягає в тому, що на матрицю основного металу накладають з обох сторін листи іншого металу, потім весь пакет піддають гарячій прокатці. В результаті термодифузії на межі поділу металів отримують міцний тришаровий виріб.

Для плакування застосовують метали і сплави, що мають високу зварюваність: вуглецеві і кислотостійкі сталі, дюралюміній, сплави міді. В якості захисного покриття для плакування використовують алюміній, тантал, молібден, титан, нікель, спеціальні сталі [5, 6].

Біметали отримані плакуванням використовують не тільки в якості конструкційних та функціональних матеріалів, а також для виготовлення інструментів різного призначення. Наприклад давно відомо виготовлення ламінованої сталі.

Ламінована сталь, ламінат— це назви композитного матеріалу (сталі), що використовується для

клинків і ножів. Власне термін "ламінат" походить від латинського lamina (аркуш, пластина). Цей клинковий матеріал одержують за допомогою ковальського зварювання, і в ножовій термінології він отримав позначення Laminated Steel Blade [7]. Як і при плакуванні, ламінат складається з центрального листа (пластини), покритого з обох сторін листами сталі іншої марки. За рахунок різних властивостей центрального листа та обкладок інструмент з ламінату отримує покращені характеристики. Зазвичай центральний шар виконують з твердої сталі (часто з високовуглецевої або низьколегованої), а обкладки - з м'якшої і більш в'язкої, але з високими антикорозійними властивостями.

Значну частину деталей складної конфігурації що забезпечують експлуатаційну надійність продукції багатьох підприємств, виготовляють вільним куванням або штампуванням. Процес вільного кування дозволяє отримувати вироби різної форми зі зливків або катаної заготовки. Одна з переваг кування – простота виготовлення інструмента, який має універсальне призначення (на одному і тому ж інструменті отримують вироби різноманітної форми). Куванням виготовляють вироби різноманітних типів, маси, форми, розмірів, точності і шорсткості поверхні, при цьому використовують метали різних хімічних складів, пластичності, міцності. Куванням і штампуванням можуть бути оброблені майже всі використовувані в промисловості метали і сплави. Однак, одною із основних проблем при виготовленні багатошарових сталевих композитів є забезпечення якісного зварювання між шарами різних сталей.

Мета. Метою досліджень, що проводились в даній роботі є використання моделювання процесу кування пакетів із сталей різного призначення для визначення параметрів, що характеризують поведінку композитних матеріалів, врахування яких необхідно для розробки технології отримання багатошарових сталевих поковок з проміжними шарами із міді та латуні.

Матеріали та методи дослідження.

Для багатошарових пакетів, що підлягали куванню використовували наступні сплави (табл. 1): для центрального шару сталі марок ШХ15, Ст.3, для обкладок сталь AISI321, що є аналогом сталі 08X18H10T, для проміжних шарів – Мідь марки М1 та латунь марки Л63.

Вибір для центрального шару хромистої сталі ШХ15 пояснюється її характеристиками, а саме: підвищений вміст вуглецю забезпечує високу твердість, зносостійкість, контактну міцність і стійкість до втомних напружень, стійкість до високих ударних та зовнішніх механічних навантажень. На деталях із даної сталі практично не утворюються вм'ятини від точних впливів. Структура сталі добре піддається термообробці - загартування і відпал дають можливість поліпшити міцність. Пластичність і в'язкість у сплаві, що розглядається, знаходяться на середньому рівні через велику твердість. Дана сталь відрізняється дрібнозернистою однорідною

структурою та мінімальним вмістом неметалевих включень, має хорошу прожарюваність, Вона досить тугоплавка і відмінно проводить тепло. Однак серед недоліків слід зазначити слабку стійкість до дії корозії та погану зварюваність. Високу твердість

сплав досягає завдяки великому вмісту вуглецю, елемента який негативно позначається на зварюваності. Для зварювання ШХ15 використовується тільки контактне зварювання.

Таблиця 1. Хімічний склад експериментальних сплавів*

Хімічний Елемент, %	Марка сплаву				
	ШХ15	Ст.3	AISI321	Мідь М1	Латунь Л63
C	0,95–1,05	0.14 - 0.22	до 0,08	-	-
Si	0,17–0,37	0.15 - 0.3	до 0,8	-	-
Mn	0,2–0,4	0.4 - 0.65	до 2	-	-
Ni	0,3	до 0.3	9-11	до 0.002	-
S	0,02	до 0.05	до 0,02	до 0,004	-
Ti	0,01		до 1	-	-
P	0,027	до 0.04	до 0,035	-	до 0.01
Cr	1,3–1,65	до 0.3	17-19	-	
Cu	0,25	до 0.3	до 0,3	+Ag min 99.9	62-65
Fe	решта	решта	~65	до 0,005	до 0.2
Pb	-	-	-	до 0.005	до 0.07
Zn	-	-	-	до 0.004	34.22 - 37.5
Sb	-	-	-	до 0.001	до 0.005
Bi	-	-	-	до 0.002	до 0.001
O	0,0015	-	-	0,05	-
домішки	-	0,088	-	0,004	0,5

*Т плавлення міді М1- 1083°C; Т плавлення латуні Л63 -906°C

Такі властивості спонукали для поверхневих обкладок застосувати корозійностійку сталь 08X18H10T (AISI321), а для покращення зварювання основного шару з матеріалом обкладок застосувати проміжний шар із латуні або міді. Крім того передбачалося, що наявність проміжного шару сприятиме запобіганню дифузії вуглецю із сталі ШХ15 в аустеніт низьковуглецевої

корозійностійкої сталі обкладок, що в край небажано з двох причин: 1- збільшення вуглецю в сталі 08X18H10T може викликати підвищення можливості міжкристалітної корозії за рахунок збіднення аустеніту хромом при додатковому утворенні карбідів, що містять хром; 2 - зменшення вуглецю в сталі ШХ15 погіршить її властивості, що формуються при термічній обробці.

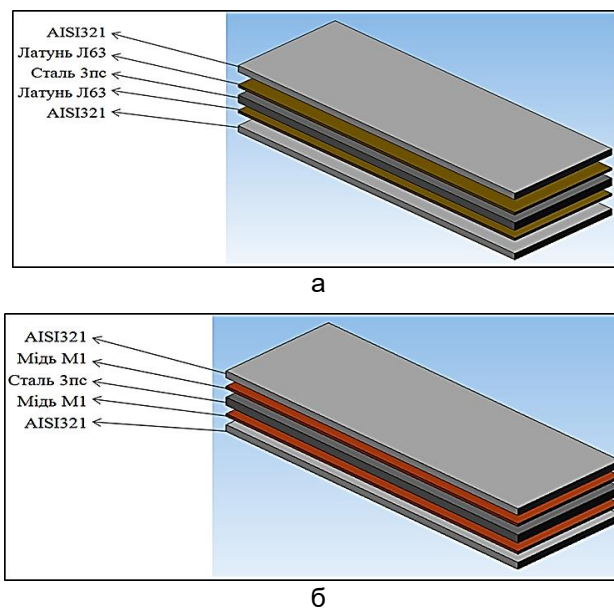


Рисунок 1. Підготовка пакету до кування:

а-пакет проміжний шар з латуні Л63, б – проміжний шар з міді М1

Для проведення експериментальних досліджень було складено наступні пакети 1:

1 пакет: сталь ШХ15 товщиною – 3 мм; мідь марки М1, товщиною – 1мм; корозійностійка сталь аустенітного класу AISI321 товщиною – 2,5 мм;

2 пакет: сталь: Ст.3 товщиною – 3мм; мідь марки М1, товщиною – 1мм; корозійностійка сталь аустенітного класу AISI321 товщиною – 2,5 мм;

3 пакет: сталь: Ст.3 товщиною – 3мм; латунь марки Л63, товщиною – 1мм; корозійностійка сталь аустенітного класу AISI321 товщиною – 2,5 мм.

На рисунку 1 показано схему складання пакетів 2 та 3. Пакет із сталлю ШХ15 має вигляд подібно пакету 2.

Розміри готового пакету: Довжина – 100 мм; товщина – 10 мм; ширина – 35 мм. Перед початком кування пакет герметично закріпили електродуговим зварюванням.

Результати досліджень. Для розроблення режиму кування багатшарових заготовок в роботі здійснювали комп'ютерне моделювання у програмі QForm [8], попередньо зробивши модель, заготовки та інструмента деформації в програмі SolidWorks, збереження моделі в форматі * dxf. Прийняті розміри заготовки: товщина 10 мм, висота 100 мм; матеріал заготовки: Ст.3пс, AISI321; температура верхнього і нижнього бойку 20°C; час охолодження на повітрі 3 с.

На рис. 2 показано розподіл температур на поверхні і всередині заготовки після першого удару. Тобто при ударі підвищення температури складає майже 25...30°C.

Важливо також дослідити яким чином при першому ударі розподіляються напруження на поверхні і всередині поковки (рис. 3).

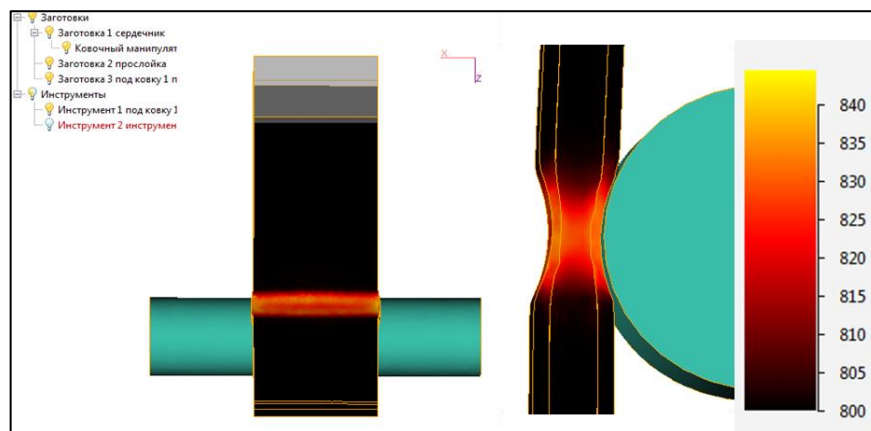


Рисунок 2. Розподіл температури в тришаровій заготовці після першого удару

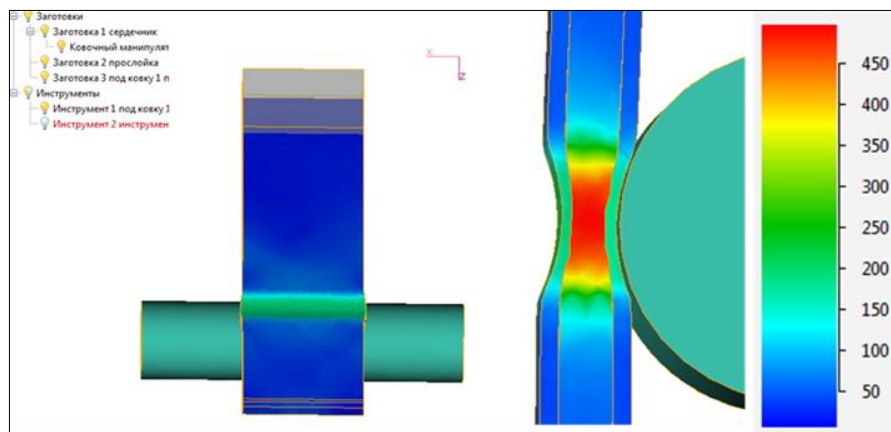


Рисунок 3. Розподіл інтенсивності напружень після першого удару

Найбільш інтенсивний напружений стан спостерігається у внутрішньому шарі, а в поверхневих шарах значно менше. Навпаки цьому, більш інтенсивному пластичному деформуванню підлягають поверхневі шари аустенітної корозійностійкої сталі, а центральний шар отримує майже в 2 рази менший ступінь деформування (рис. 4).

Враховуючи отримані результати було визначено експериментальний режим обробки

композитних пакетів.

Температуру нагріву пакетів обмежено до 950-1000°C у стаціонарному горні (у муфельній печі) відкритого типу. Для процесу кування використовували пневматичний молот з масою падаючих частин 50 кг, швидкість деформації на молоті досягала 6000 мм/хв.

Деформування експериментальних зразків здійснювали протягуванням. Після розрахунку

параметрів кування прийнято два проходи для деформування заготовки з сумарним уковом 2,56, що відповідає нормативним показникам при куванні

поковок з подовжених зливків $-\Sigma = 2,0 \dots 2,5$; при куванні з сортового прокату $-\Sigma = 1,5 \dots 2$.

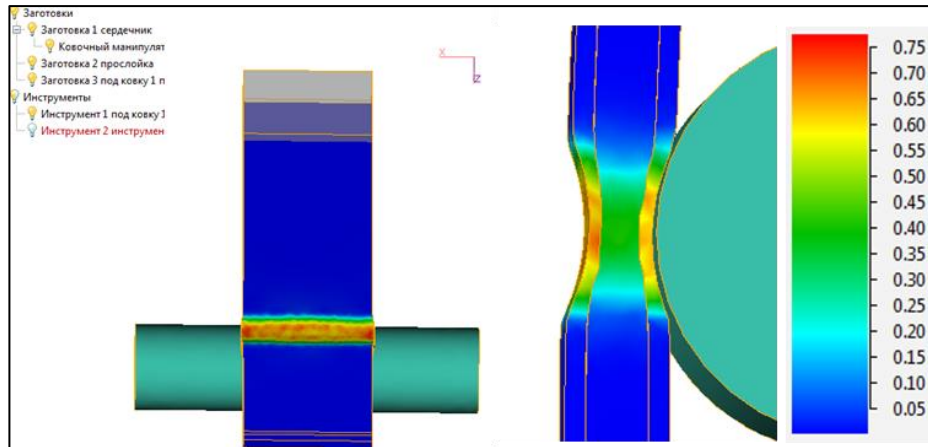


Рисунок 4. Розподіл пластичної деформації при першому ударі

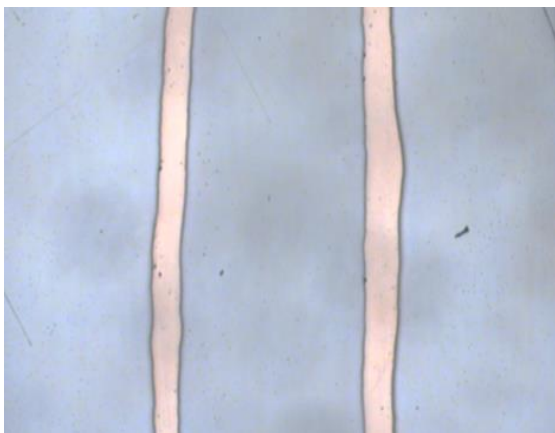
Для визначення щільності зварювання експериментальних композитних пакетів після деформування проводили мікроструктурний аналіз отриманих зразків. Допустима глибина дифузії міді в структуру сталі, без впливу на механічні властивості сталі не повинна бути більше 0,3-0,5 мм [4, 9].

Вважається, що на дифузію міді в сталеві вироби при зварюванні крім часу контактування зі сталлю міді, впливають також такі фактори: напружений стан металу, структурний стан і хімічний склад сталі.

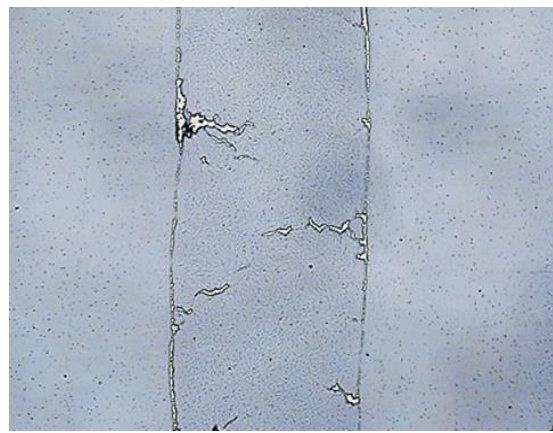
Дослідження зон контактів сплавів пакетів після кування проводили за допомогою оптичного мікроскопу AXIOVERT 200 MAT. На рис. 5 показано загальний вигляд структури мікрошліфів отриманих після кування композитних пакетів №2 і №3 в подовжньому перетині після полірування без травлення.

З'єднання пластин проміжного мідного шару, як

із сталлю Ст.3, так і зі сталлю AISI321, має рівномірний щільний характер, однак у випадку із проміжними пластинами латуні спостерігається розшарування, а також масоперенесення латуні у вуглецеву сталь як наслідок того, що при деформуванні відбулося майже повне розплавлення пластини латуні Л63, що має температуру плавлення 906°C . Слід зазначити, що існують технології виготовлення біметалічних пластин наплавленням латуні або зварювання вибухом [10-12], в цьому випадку отримують цілком щільне з'єднання. В даному випадку поведінка латуні може пояснюватись так званим аномальним масо перенесенням. Цей ефект отримав свою назву за надвисокої швидкості переміщення атомів, що навіть перевищують рухливість атомів в рідкому стані металів. Як встановлено в роботах [10, 11], таке явище може виникати в разі створення напруженого стану при деформуванні або в інших зовнішніх впливах.



а



б

Рисунок 5. Структура композитних пакетів до травлення:

а - №2 з проміжним шаром із міді М1 і б - №3 з проміжним шаром із латуні Л63; при збільшенні $50\times$

Обов'язковою умовою виникнення термодинамічного стимулу, що забезпечує таке

пришвиджене масоперенесення, є локалізація напруженого стану в частині зразка при

пластичному деформуванню. Саме такий стан виявлено при моделюванні кування багат шарового зразка (рис. 3). Майже максимальні напруження відчуває центральний шар з вуглецевої сталі Ст.3, що і сприяє проникненню саме в цей шар розплавленої латуні.

Крім описаного процесу спостерігається також розплавлення поверхневого шару вуглецевої сталі (рис. 6), при цьому в шарах латуні спостерігається

утворення β -фазі темного кольору, хоча у вихідному стані сплав Л63 відноситься до однофазних α латуней. Причиною цього може бути збільшення концентрації цинку у випадку розчинення міді в аустеніті обох сталей при нагріві. Дифузія міді в граничній зоні біметалу виявляється практично при 850°C і вище, і товщина дифузійного прошарку збільшується в часі за параболічним законом [11, 12].

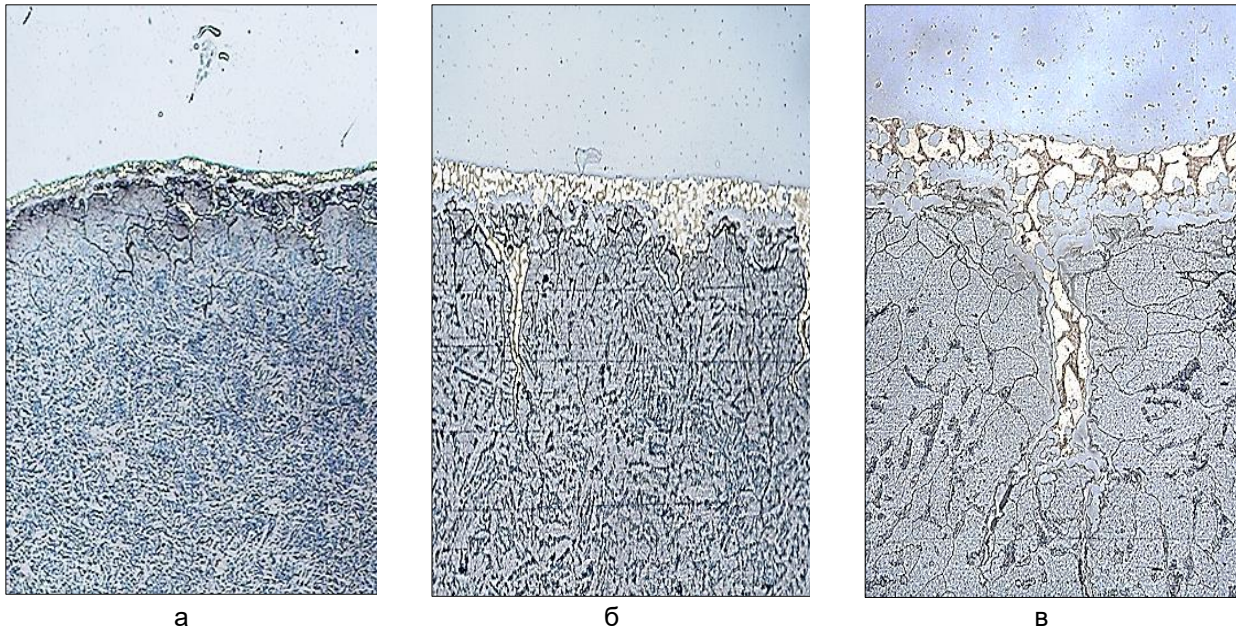


Рисунок 6. Мікроструктура зони з'єднання у композиті пакету №3 – (на фотографії з вежу) сталь AISI321; проміжний - латунь Л63; центральний шар Ст.3: а – $250\times$; б – $350\times$; в – $500\times$

Значно рідше зустрічаються надриви, що заповнення латунню і в поверхневому шарі обкладки із корозійностійкої сталі (рис. 7), а обплавлення поверхні сталей характерно для обох шарів - і

центрального, і обкладки, що (рис. 7 а). На жаль, при цьому спостерігаються відшарування проміжного матеріалу (рис. 5 б, рис. 6 а, рис. 7 а)

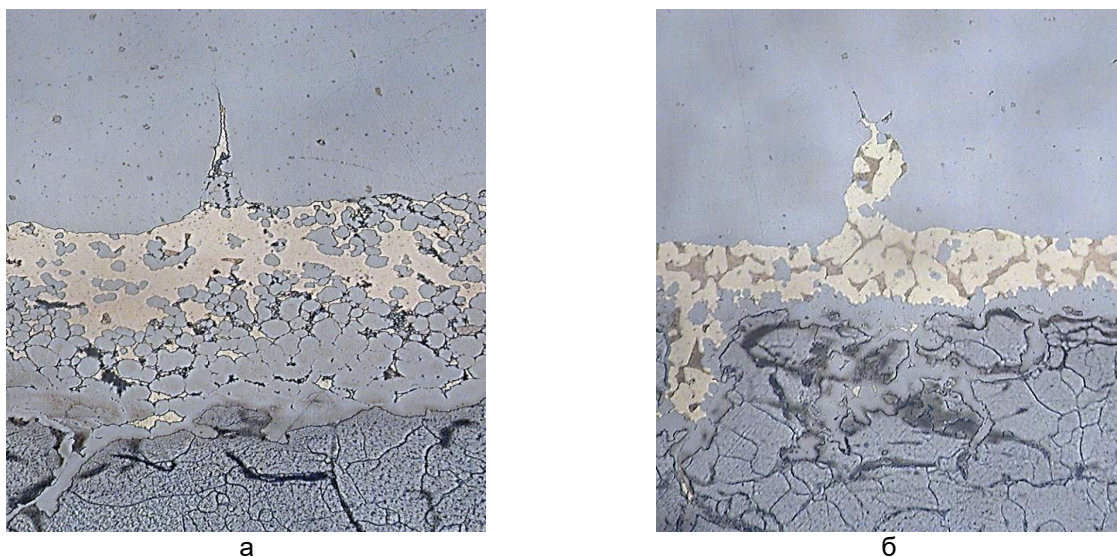


Рисунок 7. Розрив у структурі сталі AISI321 заповнений латунню: а- $850\times$; б- $1200\times$

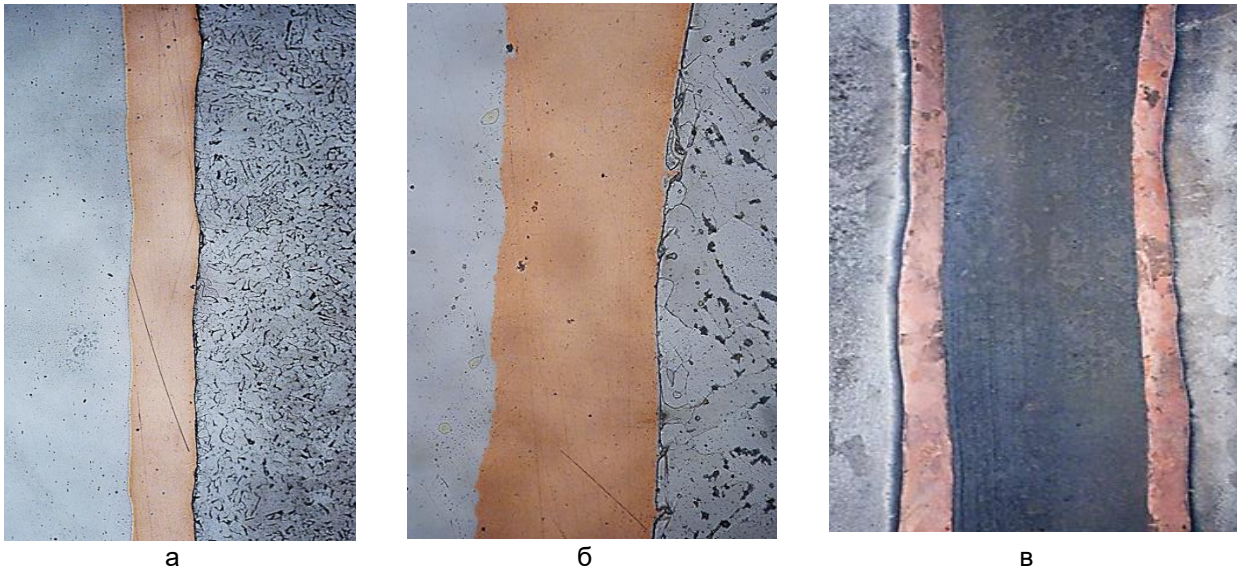


Рисунок 8. Мікроструктура з'єднання шарів сталі AISI321, міді М1 та вуглецевої сталі Ст.3 (а, б) а також композиту пакету 1(в) після кування при температурі 950-1000°C:
а-500 \times ; б -850 \times ; в – 100 \times

При дослідженні з'єднання шарів в пакеті з мідним проміжним шаром в зоні контакту із сталями розплавлення не спостерігається. На рис. 8 показані мікроструктури перехідних зон з різним збільшенням оптичного мікроскопу: спостерігається чіткий кордон між сплавами без суттєвого взаємного розчинення.

З'єднання міді із усіма сталями по всі довженні композитного зразка щільне, без розшарування. Однак у вуглецевій сталі зустрічаються надриви, що заповненні міддю (рис. 9 а, б), а з'єднання міді з корозійностійкою сталлю має ділянки з хвилястою межею (рис. 9 в). І хоча деформування відбувалось при температурах, коли розплавлення не відбувається, мікрокартина нагадує локальні

оплавлення на контактній поверхні. Така поведінка сплавів називається терміном «холодне плавлення».

Утворення такого з'єднання виявлено при зварюванні вибухом, коли холодне плавлення виникає за рахунок дії високих тисків [10-12], що стимулюють підвищену кількість нерівноважних вакансій як на початку плавлення.

При застосуванні спеціального травлення (в розчині NH_4OH) виявляється структура міді, вона майже рівновісна, крупнозерниста і поліедрична з наявними ознаками кристалів – двійників, що засвідчує факт проходження рекристалізації в процесі гарячого деформування і під час охолодження на повітрі (рис. 9 а).

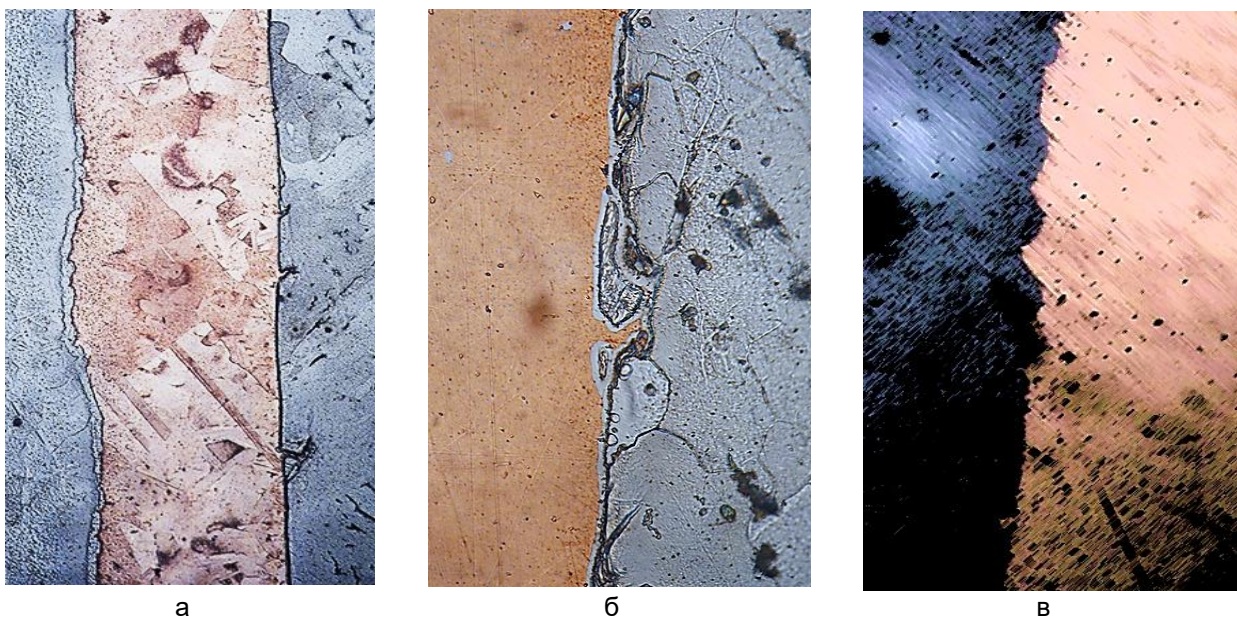


Рисунок 9. Особливості мікроструктури контактних зон мідного проміжного шару із сталевими:
а – 850 \times ; б – 1500 \times ; в – 1200 \times

Висновки

В роботі проведено комп'ютерне моделювання у програмі QForm процесу кування, а саме протягування, тришарових пакетів, що склалися із центрального шару низьковуглецевої сталі і обкладок із корозійностійкої аустенітної сталі, яке показало, що при першому ударі спостерігається підвищення температури в обох шарах майже на 30-35°C. Більшу ступінь деформування отримують шари обкладок із сталі AISI321, а при цьому більш напружений стан виникає в центральному шарі сталі Ст 3.

Враховуючи отримані результати моделювання, визначено режими нагріву та проведено

кування композитних пакетів із різних сталей. Температуру нагріву пакетів обмежено до 950-1000°C, швидкість деформації на молоті досягала 6000 мм/хв.

Досліджено особливості мікроструктури в зонах контактного зварювання шарів латунь – вуглецева сталь і латунь сталь AISI321, мідь – вуглецева сталь, мідь – сталь AISI321, мідь сталь ШХ15.

В якості проміжного шару для кращого зварювання сталевих шарів між собою в процесі кування, а також для запобігання дифузії вуглецю та легуючих елементів, доречно рекомендувати застосування пластини міді М1.

Перелік посилань

- 1 Лихошва В.П., Шатрава А.П., Пелікан О.А., Сучасні способи виробництва біметалевих виробів/ Метал і литво України / Київ:ФТІМС НАН України, 2018.-№9-10 (304-305). С 46-52.
- 2 Bykov, A.A. Bimetal production and applications. *Steel Transl.* 41, 778–786 (2011). <https://doi.org/10.3103/S096709121109004X>
- 3 Wrobel T., Szajnar J. Bimetallic casting: ferritic stainless steel – grey cast iron // *Archives of metallurgy and materials.* – 2015. – Vol. 60. – Iss. 3. – pp. 2361–2365. DOI:10.1515/amm-2015-0385. License CC BY 4.0
- 4 Крахмальов О.В., Ситников П.А. Технологічні особливості зварювання двошарових сталей в енергетичному комплексі/Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. НТУ ХПІ. Харків.- 2017. Ч. II.- С.38 ISSN 2222-2944. <http://repository.kpi.kharkov.ua>
- 5 Біметали [Архівовано 22 листопада 2016 у Wayback Machine.] // Українська радянська енциклопедія : у 12 т. / гол. ред. М. П. Бажан ; редкол.: О. К. Антонов та ін. — 2-ге вид. — К. : Головна редакція УРЕ, 1974–1985.
- 6 Bykov, A.A. (2009), "Development of bimetal production. Part 1", *Metallurg*, vol. 8, pp. 70–75. https://rezat.ru/articles/dostupno_o_laminatnoj_stali/
- 7 <http://www.qform3d.ru/products/qform>
- 8 Krupin, A.V., Solov'ev, V.Ya., Popov, G.S., Kr'stev, M.R. (1991), *Obrabotka metallov vzryvom* [Explosion treatment of metals], *Metallurgiya*, Moscow, USSR. -494P.
- 10 Shaparev A.V., Savin I.A. Perfection of the technology of production of bimetallic tapes. *Kursk: The University Book*, 2015. 214 p.
- 11 Boldyrew, W. W. Der mechanismus der tribochemischen zerlegung anorganischer salze / W. W. Boldyrew // *Z. Phys. Chem.* – 1975. – Bd. 256. – № 2. – P. 342–348.
- 12 Glagolev V.V., Markin A.A., Pashinov S.V. Bimetallicheskaya plastina v odnorodnom temperaturnom pole (A bimetallic plate in a uniform temperature field). *Mechanics of composite materials and structures*. Volume 23. № 3, 2017. - p. 331-343.

References

1. Lykshosha, V. P., Shatrava, A. P., & Pelikan, O. A. (2018). Suchasni sposoby vyrobnystva bimetalovykh vyrobiv. *Metal i lytvo Ukrainy*, ((9-10)(304-305)), 46-52
2. Bykov, A. A. (2011). Bimetal production and applications. *Steel Transl.* 41, 778–786. <https://doi.org/10.3103/S096709121109004X>
3. Wrobel, T., & Szajnar, J. (2015). Bimetallic casting: ferritic stainless steel – grey cast iron. *Archives of metallurgy and materials*, 60(3), 2361–2365. <https://doi.org/10.1515/amm-2015-0385>
4. Krakhmalov, O. V., & Sytnikov, P. A. (2017). Tekhnolohichni osoblyvosti zvariuvannya dvoшarovykh staley v enerhetychnomu kompleksi. *Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia*. Part 2. pp. 38
5. Bimetalny. (1974-1985). In Bazhan, M. P. (Ed.) *Ukrainska radianska entsyklopediia*. 2-nd edition. Holovna redaktsiia URE
6. Bykov, A. A. (2009). Development of bimetal production. Part 1. *Metallurg*, 8, 70–75
7. URL: https://rezat.ru/articles/dostupno_o_laminatnoj_stali/
8. URL: <http://www.qform3d.ru/products/qform>
9. Krupin, A. V., Solov'ev, V. Ya., Popov, G. S., & Kr'stev, M. R. (1991). *Obrabotka metallov vzryvom* [Explosion treatment of metals]. *Metallurgiya*
10. Shaparev, A. V., & Savin, I. A. (2015). Perfection of the technology of production of bimetallic tapes. *The University Book*
11. Boldyrew, W. W. (1975). Der mechanismus der tribochemischen zerlegung anorganischer salze. *Z. Phys. Chem.*, 256(2), 342–348
12. Glagolev, V. V., Markin, A. A., & Pashinov, S. V. (2017). Bimetallicheskaya plastina v odnorodnom temperaturnom pole (A bimetallic plate in a uniform temperature field). *Mechanics of composite materials and structures*, 23(3), 331-343