

Advances in high-vacuum hot presses now allow superior pressure control and rapid cooling systems to improve the bond, increase yields and significantly decrease cycle time. (courtesy of PVA TePla America)

הדבקת מתכות במהלך דפוזיוני נחשבת לשיטה חיונית ביותר על מנת להשיג שלמות מבנה אולטימטיבית תוך מהלך חיבור טהור בין שתי מתכות דומות. התהליך מתבצע בטמפרטורה גבוהה ודורש לחץ גבוהה לאיחוי המתכות יחדיו בכבישה חמה שגורמת לאטומים בפני השטח להשתבץ ולייצור הדבקה.

כפי הנראה אין היום תהליכי חיבור חומרים בצורה מסחרית שיכולים לספק תוצאות אחידות וקבועות כמו תהליך ההדבקה הדפוזיוני. הלחץ בתהליך מושג באמצעות מכבש חם המשלב תוכנה חכמה ורגשי תגובה (loop sensors) לצורך של בקרה בדיוקים מיקרומטריים, המכבש יכול להפעיל לחץ קבוע ושווה על מספר מטרים ריבועיים של שטח להרכבה של קומפונטות מורכבות. כתוצאה מכך הטכנולוגיה הזו מרתקת את מהנדסי התכן בעיקר בתעשיית הסמיקונדקטור, איירספייס ותעשיית האנרגיה.

תהליך ההדבקה

יחד עם התפתחות הרמה הגבוהה של יכולת בקרה על התהליך, ההדבקה התפתחה גם לחיבור מתכות שונות. תהליכים מסחריים שיש בהם ענין כוללים חיבור של טיטניום לנתכי ברזל-ניקל, נתכי טיטניום לנתכי פלב"מ ואפילו אלומיניום לאפליקציות מתכתיות אחרות. התהליך יכול לזווג בין נתכים שונים באותה קבוצת חומרים כמו – פלדה, פלדת כלים ו MMC (metal matrix composite). על מנת להצליח בהדבקה דפוזיונית נדרשת הבנה של מורכבויות התהליך והאפקט על התכונות הכימיות והתרמומכניות של ההדבקה. על פי המומחים, עקב המיקוד של התעשיות המסורתיות בריתוך וברייזינג אנו מוצאים יחסית מעט מידע פורמלי בנושא הדבקה דפוזיונית. הפקת תועלת מהרכב תכונות של מתכות שונות היא הסיבה העיקרית לחקור את ההדבקה הדפוזיונית. כאשר היצרנים כבר מגיעים לשימוש בתהליך מסתבר שהבנתם בדרך כלל מועטה עד מינורית בתכנון החלקים והתהליך, תידרש להם הדרכה בהתייעצות עם מומחים בנושאים כמו חימום, קירור וערכי לחץ



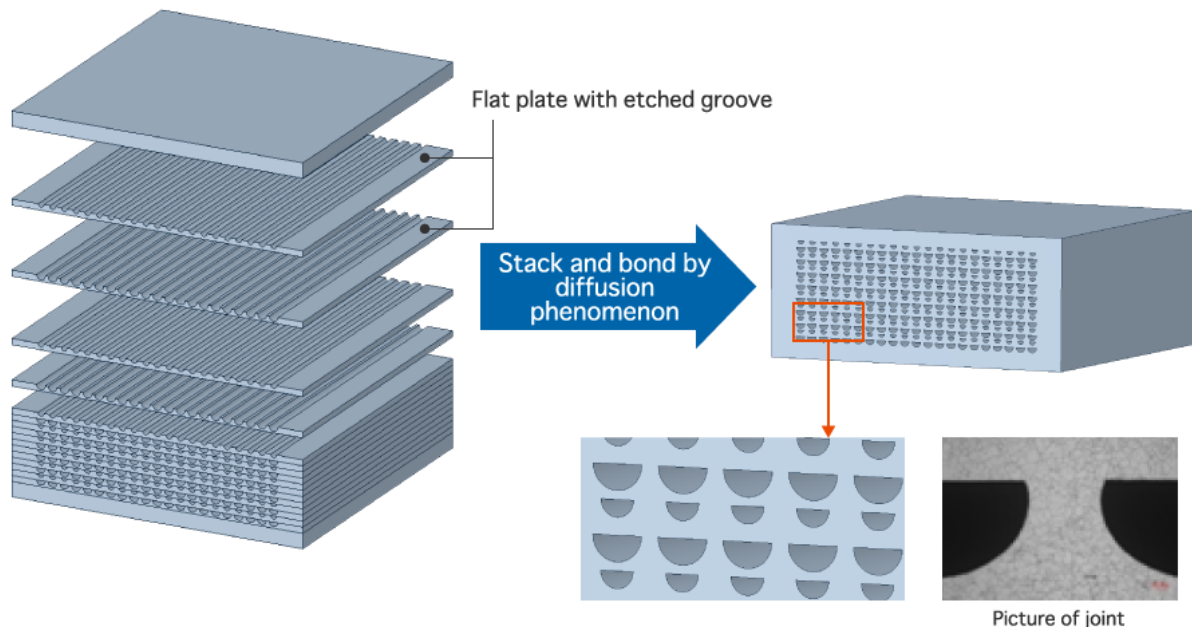
חיבור דפוזיוני – מחבר גם מתכות שונות

על מנת להגיע במהירות להבנת התועלות של ההדבקה הדפוזיונית. גישה כזו של שימוש בידע של מומחים יכולה לעזור לייצור תהליך הדבקה דפוזיוני אפקטיבי ובעלויות סבירות.

היתרונות

החשיבות בחיבור חומרים שונים נובע בדרך כלל מהצורך לחשוף את המתכת המתאימה לתנאי סביבה ספציפיים שבה נתך אחיד אינו מתפקד כנדרש. סיבה נוספת לייצור מערכת חומרים שונה היא לייצור מערכת קלה במשקל או מספקת התנגדות לקורוזיה שניתן להשיגם רק ע"י הרכבה של שני חומרים שונים ביחד.

להדבקה דפוזיונית יש פוטנציאל משמעותי לאפליקציות קירור מותאמות. הקונספט הוא להדביק שכבות של חומר עם תעלות/ מיקרו תעלות מעובדות מכנית או מכופפות. כאשר מחברים את השכבות עם ה- CHANNELS ניתן לקבל קירור או התפשטות של החום באותה אפליקציה.



את השכבות ניתן להדביק עד ל-STACK מצטבר של 600 מ"מ במכשירים חדשניים ועדיין לשמור על החוזק של ההרכבה כמו בחומרים המקוריים.

הבנת התהליך

המוסדות האקדמיים חוקרים את חיבורם של חומרים שונים במשך עשרות שנים והרבה מהמיקוד ניתן לחומרים בעלי ביצועים אולטימטיביים כמו נתכי טיטניום. זה יכול להתרחב מעבר לטיטניום מסחרי טהור (CP) שלעיתים מוצאים את קיומה של שכבה בין מתכתית.

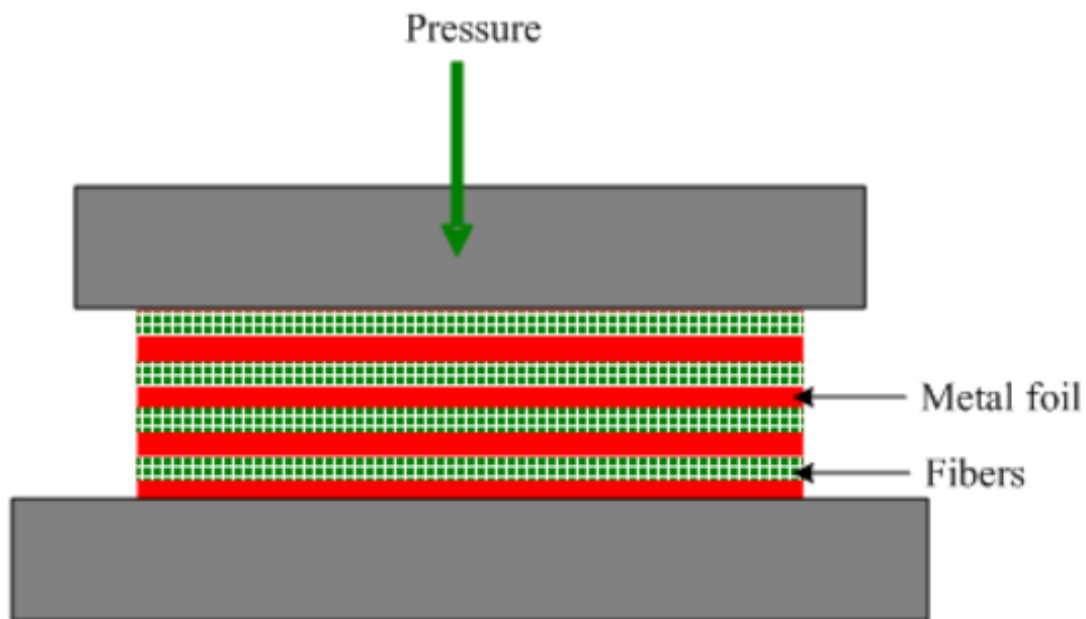
היסודות המומסים המשפיעים כמו נחושת, ניקל וכסף הם הדרייברים הראשיים להיווצרות שכבה בין מתכתית בטיטניום. תהליך ההדבקה הדפוזיונית יכול להתרחש בשני מצבים – מצב מוצק ומצב נוזלי.



חיבור דפוזיוני – מחבר גם מתכות שונות

חומרים זהים הודבקו היסטורית בתהליך של מצב מוצק. מנקודת מבט של הרכבה תהליך זה היה פשוט יותר ושטחי המגע הותאמו בקלות לפני הכנסתם לתנור. ניתן להתשמש בתהליך זה גם בפיני מיקום או בפיקים (נק' ריתוך). היות ואין נוכחות של מצב נוזלי בהדבקה דפוזיונית, נוצרת דפורמציה קלה על המשטח, כתוצאה מהפעלת הלחץ על מנת לשטח את הפגמים בפני השטח ולשבור את שארית התחמוצת על פני השטח לפני הדבקה.

Diffusion Bonding

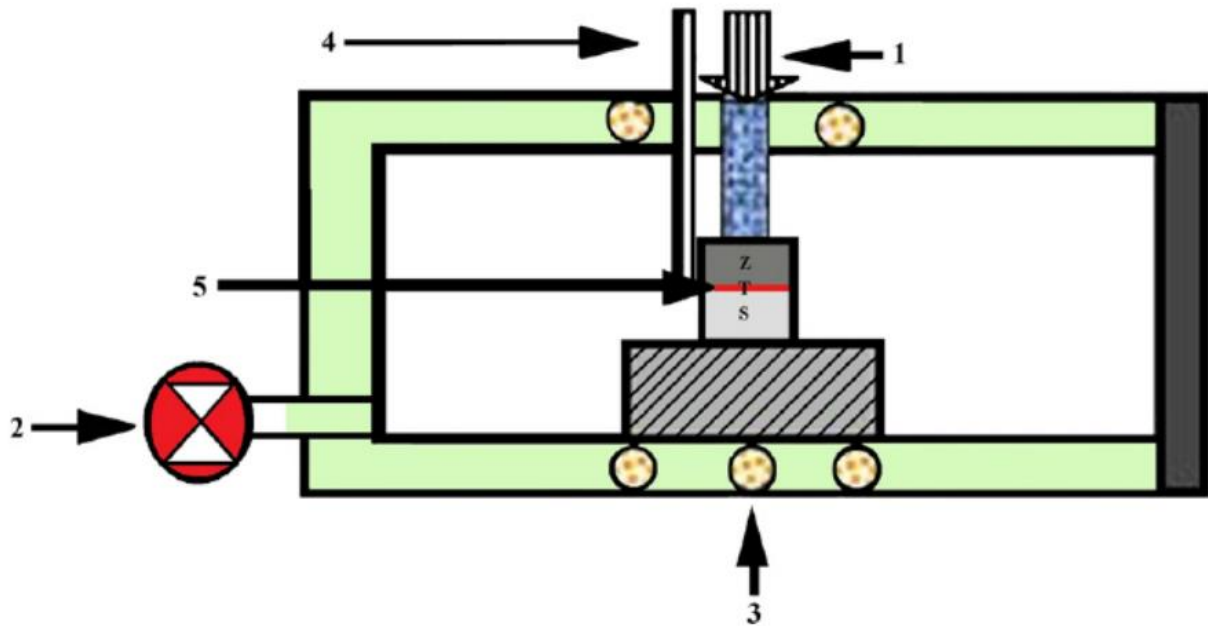


בהדבקה במצב נוזלי (Liquid phase) השכבות הפנימיות ניתכות במשטחי המגע. במקרה הזה נדרש לחץ יותר נמוך מאשר בחיבור מוצק, כמובן שיש פחות דפורמציה על המשטח. בתלות במחזור התרמי ובהרכב החומר של השכבות הפנימיות שנבחרו מתרחשת דפוזיה בין השכבות והחומר הבסיסי בכל צד של החיבור ונוצר שינוי פזה אוטקטי או פריטי בלשון מטלורגית.

העובי של שכבת ראקציה התוך מתכתית היא ראשית תוצאה של דפוזיה במצב נוזלי ושנית מהדפוזיה המוצקה. חוזק ההדבקה הוא פונקציה של תרכובת בין מתכתית היוצרת עובי של אזור התרכובת הבין מתכתית כולל חריגות כמו חללים (voids) בממשק.



חיבור דפוזיוני – מחבר גם מתכות שונות



– Schematic illustration of partial transient liquid phase diffusion bonding: (1) free load, (2) vacuum rotary, (3) heat coil, (4) thermocouple and (5) specimens.

חקירת חיבור דפוזיוני

יש מספר דרכים לחקור כיצד דפוזיה של מתכות לא זהות יכולה להועיל למתכננים וליצרנים השונים. יש בנמצא ספרות מדעית זמינה להרכבה של מתכות ספציפיות עם זמני תהליך וטמפרטורה כתלות באפליקציה. לדוגמה, אפשר להתייחס לפרסום של Cooke & Kaviani משנת 2020 במגזין Manufacturing & materials processing על חיבור מתכות לא זהות שמתייחס לטיטניום, פלב"מ, אלומיניום ומגנסיום. למרות המחקר הנרחב בנושא מהנדסי התכן יגלו את האתגר כאשר ינסו להפוך את האינפורמציה הקיימת למשהו ממשי בעולם האמיתי של תכנון חלקים. חברות עם מומחים ובסיס מידע רחב יגלמו את המידע המדעי ונסיון מאפליקציות קודמות לפרמטרים מוצלחים. חלק מהחברות הבונות את הציוד יכולות גם כן לספק את המידע הדרוש הכולל הרכבים של חומרים ספציפיים, זמני תהליך וטמפרטורות. תכנון נכון יאפשר הדבקה דפוזיונית של מכללים בין אם הממשק אינטימי ובין אם מספר ממשקים מקבילים בו זמנית. חשוב לזכור שמשטח שאינו ניצב ללחץ של המכש ההידראולי לא יתחבר כהלכה. חשוב מאד אחרי התכן לייצר דגמים על מנת לאמת את התכונות של אזורי ההדבקה.



למרות היתרונות של חיבור דפוזיוני השימוש בה היה מוגבל עד לאחרונה משיקוליים של קשיי ביצוע מעשיים שהתבטאו באופן ספציפי במגבלת מידות תא התנור והקושי לשלוט בלחץ אחיד על פני כל משטח החלק בנוסף זמני תהליך מאד ארוכים שנמשכו לעיתים יום שלם.



חידושים שנעשו במכשירים, במערכות החימום ובתהליכי הואקום מאפשרים היום בקרת לחץ מדויקת ביותר ומערכות קירור מהירות שמספרים מאד את החיבור/הדבקה, את יכולת התהליך ומורידים את זמן מחזור התהליך באופן משמעותי. היום מכבש עם צילינדר הידראולי בודד יכול לספק לחץ קבוע וכח מדוד המאפשר הרבה פחות בקרה על חלקים גדולים בגיאומטריות מורכבות. על מנת לשפר את פילוג הכוחות נהוג להשתמש בפלטות לחיצה עבות מגרפיט (500-750 מ"מ) הבאות במגע עם שכבות המתכת ומאפשרות לחץ הרבה יותר אחיד. הפלטות הללו מכניסות חסרון בצורת המקום שהן תופסות ומוסיפות בגלל הנפח שלהן לזמן החימום של משטחי המתכת. יש גם יצרנים שמציעים מערכת רב צילינדריית עם פלטות לחץ גדולות המסוגלות להכיל מגוון גדול של חלקים. פלטות המכבש הגדולות הזמינות היום : 900 X1250 מ"מ בלחץ של 4000 KN . את הלחץ האחיד על פני המשטח מקבלים באמצעות בקרה נפרדת לכל צילינדר הכוללת טרנדיוסורים למדידת מיקום. הצילינדרים ההידראוליים ניתנים לכיוונון אינדיבדואלית באמצעות היזונים חוזרים מרגשים (SENSOR) על מנת להשיג אחידות על משטחים גדולים. בציוד החדש יש אפשרות לבצע אופטימיזציה בבדיקת דיו פיזית המזהה אזורים על המשטח שבהם מופעל לחץ לא אחיד.



חיבור דפוזיוני – מחבר גם מתכות שונות

הציוד הקיים היום מאפשר מדידה פרטנית של תכונות המתכת במהלך ההדבקה כמו לדוגמא, היזון חוזר המראה את דחיסות החומרים במהלך הלחיצה או העיצוב במעבר מנוזל. ממולץ לבדוק את שלמות ההדבקה לאחר התהליך בבדיות ללא הרס כמו ספקטרוסקופית X RAY ואחרים.

אז מה המסקנה ?

למרות עניין גובר בחיבור דפוזיוני, כל הישומים דורשים עדיין מחקר מעמיק כדי לייעל את התהליך. מומלץ מלהכתחילה לשתף מומחה בחיבור דפוזיוני שיכול להעניק ליצרנים יתרון תחרותי מתכנון החלקים ועד אפטימזציה בייצור.