



بررسی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های تولید شده Al1050-CNT با استفاده از روش اتصال فشاری قالب تجمعی (ACCB)

حسین جعفرزاده^{۱*}، احسان شالچی^۲، محرم شاملی^۳

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران

۲- کارشناس ارشد، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران

۳- استادیار، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران، تبریز، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: h.jafarzadeh@iaut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۶ بهمن ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۴ اردیبهشت ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

نانوکامپوزیت

کامپوزیت Al1050CNT

روش اتصال فشاری قالب تجمعی

خواص مکانیکی

چکیده

در تحقیق حاضر یک روش جدید تغییر شکل پلاستیک شدید به نام اتصال فشاری قالب تجمعی برای تولید نانوکامپوزیت‌های نانو لوله کربنی Al1050 ارائه شده است. ریزساختار و خواص مکانیکی آلومینیوم ۱۰۵۰ و همچنین کامپوزیت‌های فرآوری شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و تست کشش آنالیز شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که میانگین اندازه دانه آلومینیوم پس از یک و دو سیکل از فرایند اتصال فشاری قالب تجمعی به ترتیب به محدوده‌های ۷ و ۴ میکرومتر کاهش می‌یابد. کامپوزیت‌های فرآوری شده و آلومینیوم ۱۰۵۰ تغییر شکل پلاستیکی همگن محدودی را نشان دادند که نشان دهنده ظرفیت محدود کارسختی به دلیل چگالی نابجایی بالا در طی فرایند اتصال فشاری قالب تجمعی است. همچنین استحکام کششی کامپوزیت‌های Al1050-CNT با افزایش سیکل‌های تغییر شکل افزایش یافت. همچنین نشان داده شد که مکانیسم‌های مختلفی باعث بهبود خواص مکانیکی از جمله افزایش چگالی نابجایی و کسر تقویت‌کننده و کاهش اندازه دانه‌ها با تغییر شکل پلاستیک هستند. سطح شکست حاصل از آزمون کشش ترکیبی از شکست شکل‌پذیر و شکننده در طول تغییر شکل کششی را نشان داد.

Fabrication and characterization of the mechanical properties of Al1050-CNT composites using accumulative channel-die compression bonding process

Hossein Jafarzadeh^{1*}, Ehsan Shalchi², Moharram Shameli³

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Tabriz branch, Tabriz, Iran

2- MSc, Space Thruster Research Institute, Iran Space Institute, Tabriz, Iran

3- Assistant Professor, Space Thruster Research Institute, Iran Space Institute, Tabriz, Iran

* Corresponding Author's Email: h.jafarzadeh@iaut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 26 January 2024

Accepted: 13 May 2024

Keywords:

Nanocomposite

Al1050-CNT Composite

ACCB

Mechanical Properties

Abstract

In the present investigation a new severe plastic deformation method called accumulative channel-die compression bonding (ACCB) was adapted for fabrication of Al1050-carbon nanotube (CNT) composites. Microstructure and mechanical properties of Al1050 matrix material and synthesized composites were analyzed using SEM and tensile testing. The obtained results showed that the average grain size of matrix is reduced to 7 and 4 μm after one and two passes of ACCB respectively. Processed composites and Al1050 showed a limited homogeneous plastic deformation indicating the limited work hardening capacity due to the high dislocation densities developed during ACCB process. Also, the tensile strength of Al1050-CNT composites was increased with increase in deformation passes. It was demonstrated that different mechanisms are responsible for improved mechanical properties including the increase in dislocation density and reinforcement fraction and grain refinement by plastic deformation. Fractured surface were showed a combination of ductile and brittle failure during tensile deformation.

Please cite this article using:

Jafarzadeh H, Shalchi E, Shameli M. Fabrication and characterization of the mechanical properties of Al1050-CNT composites using accumulative channel-die compression bonding process. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Apr 20;11(2):69-81. doi: 10.22034/IJME.2024.437634.1922 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

تغییر شکل پلاستیک شدید^۱ یک روش بهینه جهت ریز دانه کردن و همچنین تولید مواد با نانوساختار بسیار ریز است [۱-۳]. تاکنون روش‌های مختلف تغییر شکل پلاستیکی شدید برای تولید فلزات و آلیاژهای با ساختار نانو به کار گرفته شده است که از جمله می‌توان به فرایند پرس در کانال زاویه دار^۲ [۴]، فرایند پیچش با فشار بالا^۳ [۵]، فرایند اتصال نوردی انباشتی^۴ [۶] و فرایند پرس در قالب شیار محدود^۵ [۷] و سایر روش‌های نوین اشاره نمود [۸-۱۰]. جعفرزاده و همکاران با استفاده از روش اکستروژن ترکیبی به عنوان یک روش تغییر شکل پلاستیک شدید مس خالص فوق ریزدانه با استحکام بالا [۱۱] و منیزیم AM60 فوق ریزدانه [۱۲] تولید کردند.

با استفاده از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید، می‌توان مقدار بالایی از کرنش پلاستیک را به مواد اعمال نمود [۱۲]. همچنین می‌توان از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید برای تولید کامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات با پایه فلزی استفاده کرد. به‌عنوان مثال، علیزاده [۱۳] کامپوزیت‌های Al/B4C را از طریق فرایندهای اتصال نوردی انباشتی و اتصال نوردی تکراری^۶ تولید کرد. نتایج بررسی وی نشان داد که با استفاده از این روش‌ها و با افزایش تعداد سیکل‌ها، استحکام کششی و سختی کامپوزیت‌های تولید شده افزایش می‌یابد.

لی و همکاران [۱۴] کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی Al6061 تقویت شده با ذرات سرامیکی Al₂O₃ را با استفاده از روش پرس در کانال مساوی زاویه‌دار تولید کرد. آن‌ها نشان دادند که کرنش پلاستیک شدید اعمال شده توسط این روش، اندازه دانه را از ۳۵ میکرومتر به ۱ میکرومتر کاهش می‌دهد. در یکی دیگر از تحقیقات انجام شده، توکوناگا و همکارانش [۱۵] کامپوزیت پایه آلومینیومی حاوی نانولوله‌های کربنی را با استفاده از فرایند پیچش با فشار بالا تولید کرد. نتایج آزمایش‌ها انجام یافته توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری^۷ نشان داد که اندازه دانه‌ها به ۱۰۰ نانومتر کاهش یافته است که این مقدار بسیار کوچکتر از اندازه دانه بدون استفاده از نانولوله‌های کربنی و همچنین اندازه دانه‌ها در یک نمونه بالک می‌باشد. در میان تقویت کننده‌های مختلف در تهیه کامپوزیت‌های زمینه فلزی، نانولوله‌های کربن به دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی فوق‌العاده در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه محققان مختلف قرار گرفته است [۱۶]. از این رو در چندین تحقیق نانولوله‌های کربنی جهت افزایش خصوصیات هم‌چون پایداری حرارتی، رسانایی الکتریکی، استحکام و سختی کامپوزیت‌های زمینه فلزی به کار رفته است [۱۷-۱۹].

تابش و همکاران در تحقیقی [۲۰] با استفاده از فرایند نورد تجمعی نانوکامپوزیت هیبریدی چندلایه از ورق آلومینیوم- نانولوله کربن- آلومینا تولید کردند. بررسی‌های استحکام مکانیکی نشان داد که مقدار سختی و استحکام کششی و تسلیم کامپوزیت‌های حاوی نانولوله کربن بیشتر می‌باشد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که افزودن آلومینا و نانولوله‌های کربن بصورت هم‌زمان در زمینه آلومینیومی باعث افزایش استحکام کامپوزیت شد. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد پاس‌ها ابتدا انعطاف‌پذیری کاهش و سپس افزایش یافت.

در تحقیق دیگری که توسط مروتی و مولایی داریانی [۱۸] بر روی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی توسط روش نورد تجمعی انجام گرفت، مشاهده شد که ضریب کارسختی ورق کامپوزیتی با افزایش درصد حجمی نانو لوله‌های کربنی کاهش می‌یابد؛ ولی از طرف دیگر خواص استحکام کششی به دلیل ایجاد ساختار همگن‌تر، بهبود یافته است.

اخیراً یک روش جدید تغییر شکل پلاستیک شدید به نام روش اتصال فشاری قالب تجمعی^۸ توسط کامیکاوا و همکاران [۲۱] معرفی شده است که به منظور اصلاح دانه بندی آلومینیوم با خلوص بالا استفاده می‌شود. در این روش نشان داده شد که اندازه متوسط دانه را می‌توان پس از انجام ۱۰ سیکل با استفاده از روش اتصال فشاری قالب به ۶۹۰ نانومتر کاهش داد. روش اتصال فشاری قالب تجمعی برای ساخت کامپوزیت‌های چند لایه Al/Cu با استحکام بالا برای اولین بار توسط جعفرزاده و همکاران [۲۲] پیشنهاد شده است. در نتایج تحقیقات آن‌ها، کامپوزیت پایه فلزی بالک آلومینیوم-مس با توزیع همگن لایه‌های مس تکه‌تکه شده در زمینه

¹ Severe Plastic Deformation (SPD)

² Equal-Channel Angular Pressing (ECAP)

³ High Pressure Processing (HPT)

⁴ Accumulative Roll Bonding (ARB)

⁵ Constrained Groove Pressing Process (CGP)

⁶ RRB

⁷ TEM

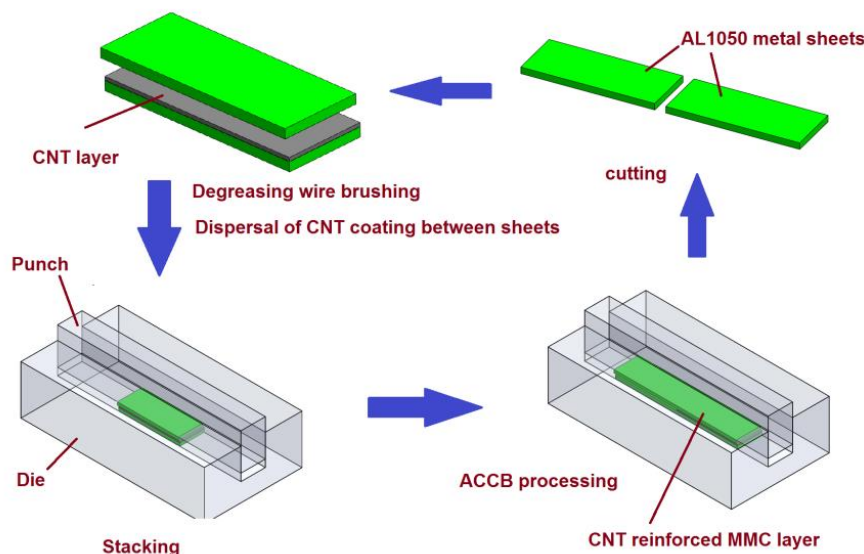
⁸ Accumulative Channel-die Compression Bonding process (ACCB)

آلومینیوم با استفاده از شش سیکل از روش اتصال فشاری قالب تجمعی تولید شد. بنابراین، در تحقیق حاضر، کامپوزیت‌های CNT-Al1050 با افزودن نانولوله‌های کربنی بین ورق‌های آلومینیومی، طی فرایند اتصال فشاری قالب تجمعی تولید شدند. همچنین ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تولید شده مورد بررسی قرار گرفته است و مکانیسم‌های تقویتی مختلفی که باعث گردیده خواص مکانیکی کامپوزیت‌های CNT-Al1050 بهبود یابد، توضیح داده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- اتصال فشاری قالب تجمعی

در تحقیق حاضر، روش جدید تغییر شکل پلاستیک شدید به نام روش اتصال فشاری قالب تجمعی برای اولین بار برای ساخت کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی استفاده شده است. این فرایند اولین بار توسط کامیکاوا و همکاران [۲۱] برای فرآوری دانه آلومینیوم با خلوص بالا مورد استفاده قرار گرفت. تصویر شماتیک روش اتصال فشاری قالب تجمعی در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در این روش شمش اولیه در قالب کانال فشرده شده و تغییر شکل می‌دهد. روش اتصال فشاری قالب تجمعی یک فرایند تغییر شکل کرنش صفحه‌ای است. در طول این فرایند، ضخامت نمونه به نصف کاهش یافته و در جهت طولی، طول قطعه کار افزایش می‌یابد و به دو برابر طول اولیه می‌رسد. بعد از این کار قطعه کار از نصف برش یافته و دو قسمت از نمونه بعد از تمیزکاری (جهت اکسیدزدایی) روی هم قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که آماده‌سازی سطح با چربی‌زدایی در استون و برس سیمی برای رفع آلودگی و دستیابی به اتصال خوب بین دو قطعه ضروری است. سپس نمونه‌های تولید شده در قالب کانال قرار می‌گیرند و به طور مشابه در معرض فشار و تغییر شکل دوم قرار می‌گیرند. فرایند پرس، برش، عملیات سطح و فشرده شدن برای دستیابی به کرنش پلاستیکی از پیش تعریف شده تکرار می‌شود.



شکل ۱ شماتیک قالب کانال در حالت فشرده سازی (روش اتصال فشاری قالب تجمعی)

در تحقیق حاضر، ماده کامپوزیتی با افزودن نانولوله‌های کربنی بین دو قسمت نمونه پس از برش و آماده‌سازی سطح تولید شد. سایر مراحل فرایند مشابه با روش کامیکاوا و همکاران [۲۱] انجام شد.

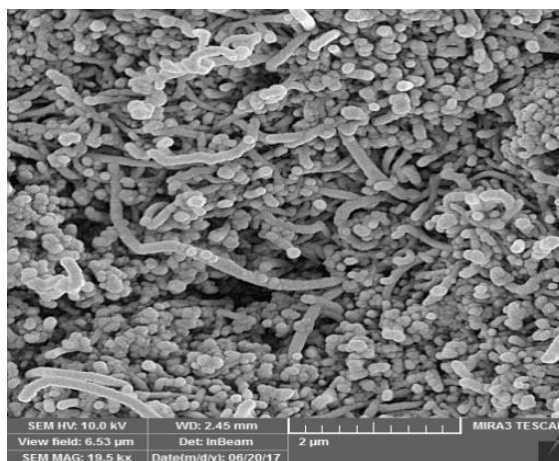
۲-۲- آزمایشات تجربی

در این تحقیق از ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ با درجه خلوص ۹۹/۳ با ترکیب شیمیایی مطابق جدول ۱ استفاده شد.

جدول ۱ آزمایش ترکیب شیمیایی ماده

Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	Ti	Al
0.01	0.01	0.09	0.49	0.01	0.04	0.02	Balance

برای تهیه نمونه اولیه، ورق‌های آلومینیوم با ضخامت ۲ میلی‌متر، عرض ۲۰ میلی‌متر و طول ۳۰ میلی‌متر برش داده شد. جهت آماده‌سازی نمونه آلومینیوم، فقط یک طرف نمونه‌های برش یافته تحت عملیات آماده‌سازی سطحی قرار گرفت. سطوح اتصال این ورق‌های آلومینیومی، ابتدا توسط برس سیمی و سنباده زبر برس کاری شدند. سپس توسط استون، چربی‌زدایی گردید تا تمام آلودگی‌ها و مواد روغنی روی آن‌ها از بین برود. سپس نانولوله‌های کربنی با قطر داخلی ۱۰-۱۵ نانومتر و طول ۳-۱۰ میکرومتر به سطح نمونه‌ها اضافه شدند. جهت اضافه کردن یکنواخت نانولوله‌های کربنی به سطوح ورق‌های آلومینیومی ابتدا یک محلول سوسپانسیون حاوی ۰/۵ درصد وزنی از نانولوله کربن در محلول اتانول تشکیل شد. در ادامه جهت هموزن‌سازی محلول از دستگاه اولتراسونیک با فرکانس ۵۰ کیلوهرتز به مدت یک ساعت استفاده گردید. سوسپانسیون یکنواخت حاصله حاوی ذرات نانولوله کربنی با استفاده از دستگاه پاشش بر روی سطوح آلومینیوم پخش گردید. سپس ورق آلومینیوم دوم بر روی لایه نانولوله کربنی پخش شده به آرامی قرار گرفت و جهت خروج اتانول بصورت بخار در داخل کوره در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده شد. شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانولوله‌های کربنی مورد استفاده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

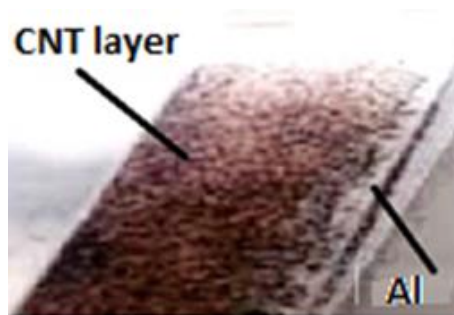


شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی از نانولوله‌های کربن

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، پس از آماده‌سازی ورق‌های آلومینیومی و اضافه شدن لایه وسطی نانولوله کربنی درون قالب جهت انجام عملیات تغییر شکل قرار داده می‌شود.



(ب)



(الف)

شکل ۳ الف) پخش نانولوله کربن روی ورق آلومینیوم و ب) قالب سنبه و ماتریس و جای‌گذاری نمونه‌های آلومینیومی داخل قالب

سپس نمونه‌ها در قالب کانال توسط پرس هیدرولیک به ضخامت ۲ میلی‌متر فشرده می‌شود. مقدار کرنش پلاستیکی وارد شده در طول هر سیکل فرایند اتصال فشاری قالب تجمعی را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد [۲۱].

$$\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{1}{1-r} \right) \quad (1)$$

که در این رابطه، r مقدار کاهش ضخامت می‌باشد. در تحقیق حاضر مقدار کاهش ضخامت حدود ۵۰٪ در نظر گرفته شد که طی آن کرنش پلاستیکی معادل ۰/۸ به نمونه در طی هر سیکل تغییر شکل اعمال می‌شود. پس از انجام سیکل اول فرایند و پس از خارج کردن نمونه از قالب، آن را از وسط بریده و یک طرف هر قسمت با استفاده از برس سیمی و چربی‌زدایی توسط استون آماده شد. سپس نانولوله‌های کربنی به سطح یک قسمت اضافه شده و نمونه‌ها روی هم چیده شدند و دوباره در کانال قالب، مشابه سیکل اول فشار داده شدند. همچنین، جهت آماده کردن نمونه‌های مرجع، برخی از نمونه‌ها بدون اضافه کردن نانولوله‌های کربنی بین قطعات، روی هم فشرده شدند. ریزساختار کامپوزیت‌های تولید شده، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ مورد بررسی قرار گرفت و خواص مکانیکی آن‌ها با آزمایش کشش و اندازه‌گیری ریزسختی ارزیابی شد. برای تعیین مشخصات ریزساختاری، سطوح نمونه‌های مانده شده با استفاده از کاغذ سنباده با گریدهای مختلف (۱۰۰-۳۰۰۰) آماده شد. سطوح آماده شده به روش سوسپانسیون ذرات Al_2O_3 در آب پولیش کاری شدند. پس از اچ کردن نمونه‌ها، مشاهدات ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی Tescan MIRA3 انجام شد. تست کشش در دمای اتاق با سرعت کشش ۵ میلی‌متر در دقیقه و توسط دستگاه AUTOGRAPH مدل AG-25TB انجام شد. همچنین ریزسختی نمونه‌ها با اعمال بار ۲۵ گرمی با مدت زمان اعمال بار ۱۰ ثانیه اندازه‌گیری شد. شرایط تولید نمونه‌های مختلف و همچنین پارامترهای مورد بررسی بصورت خلاصه در جدول ۲ بیان شده است:

جدول ۲ شرایط تولید نمونه‌های مختلف

ردیف	نوع لایه و تقویت کننده	تعداد پاس‌های تغییر شکل فرایند		
		۰	۱	۲
۱	آلومینیوم ۱۰۵۰	✓	✓	✓
۲	آلومینیوم ۱۰۵۰ + نانولوله کربنی ۰/۵ درصد وزنی	✓	✓	✓

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اندازه دانه حاصل از فرایند ACCB

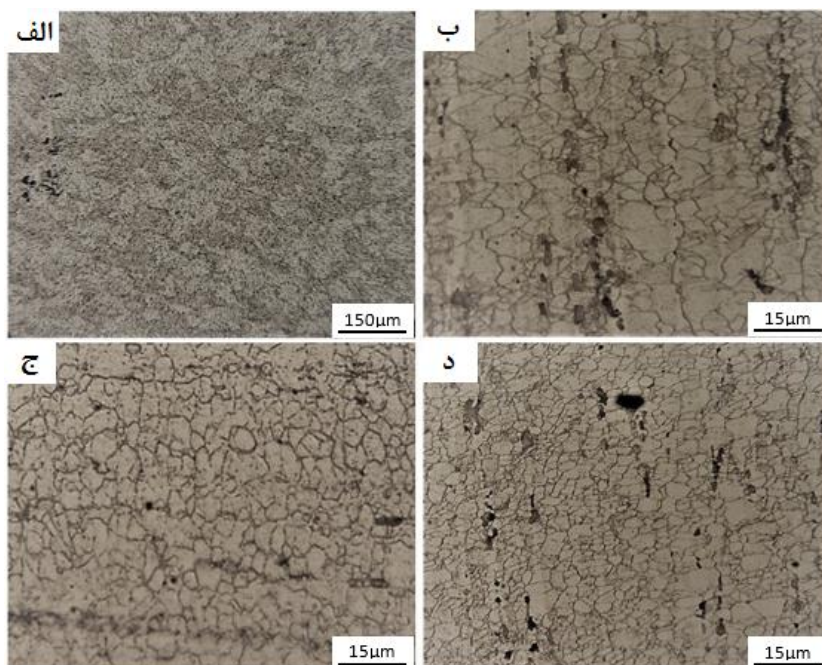
در شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار آلومینیوم ۱۰۵۰ و کامپوزیت‌های AI-CNT فراوری شده به روش اتصال فشاری قالب تجمعی نشان داده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۴-الف مشاهده می‌شود، ساختار دانه‌بندی آلومینیوم ۱۰۵۰ در این سه نوع ماده به صورت هم محور با اندازه متوسط حدود ۸۰ میکرومتر تشکیل شده است. با استفاده از نرم افزار CLEMEX توزیع اندازه دانه در ساختار کامپوزیت‌ها و آلومینیوم ۱۰۵۰ محاسبه شد. در شکل ۵ منحنی‌های توزیع اندازه دانه‌ها در زمینه آلومینیوم ۱۰۵۰ و کامپوزیت‌های AI-CNT نشان داده شده است.

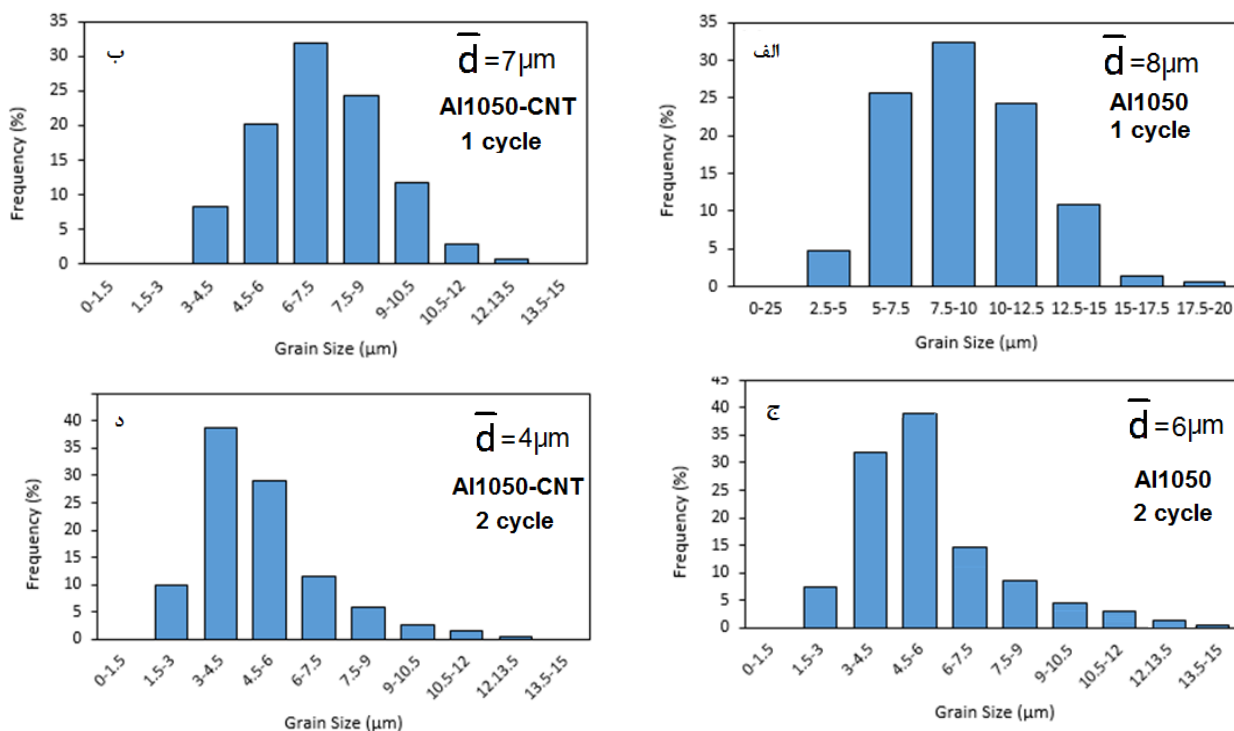
در مورد آلومینیوم ۱۰۵۰ تحت یک و دو سیکل از فرایند ACCB، به ترتیب دانه‌هایی با اندازه متوسط ۸ میکرومتر و ۶ میکرومتر بیشترین کسر حجمی را در ریزساختار دارند؛ در حالی که در مورد کامپوزیت‌های AI-CNT بعد از یک و دو پاس تغییر شکل به ترتیب دانه‌هایی با اندازه ۷ و ۴ میکرومتر بیشترین کسر حجمی را دارا می‌باشد. متوسط اندازه دانه‌های آلومینیوم ۱۰۵۰ و کامپوزیت‌های AI-CNT به صورت تابعی از پاس‌های تغییر شکل نشان داده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، آلومینیوم ۱۰۵۰ دارای درشت‌ترین دانه‌بندی می‌باشد. همچنین واضح است که با افزودن نانولوله‌های کربنی به آلومینیوم اندازه متوسط دانه‌ها در زمینه کاهش می‌یابد. این کاهش اندازه دانه‌ها به دلیل تاثیر ذرات در افزایش چگالی نابعایی‌ها در زمینه می‌باشد. همچنین با افزایش تعداد پاس‌های تغییر

¹ FE- SEM

شکل نیز اندازه متوسط دانه‌ها کاهش یافته است. با افزایش میزان کرنش اعمالی، چگالی نابیجایی‌های زمینه و اندازه دانه‌ها کاهش می‌یابد که این روند در کامپوزیت AI-CNT بعد از اعمال دو مرحله از فرایند اتصال فشاری قالب تجمعی مشاهده می‌شود. مهمترین عامل در کاهش اندازه دانه‌ها اندرکنش بین نابیجایی‌ها و تشکیل مرزهای فرعی می‌باشد. با ادامه تغییر شکل در اثر جذب نابیجایی‌ها به مرزهای کوچک زاویه، به تدریج زاویه عدم تطابق مرزها افزایش یافته و دانه‌های اصلی به‌وجود می‌آیند [۲۳، ۲۴].



شکل ۴ ریزساختار حاصل از تغییر شکل پلاستیک شدید: الف) آلومینیم ۱۰۵۰ اولیه، ب) آلومینیم ۱۰۵۰ بعد از یک پاس ACCB، ج) کامپوزیت AI-CNT بعد از یک مرحله ACCB و د) کامپوزیت AI-CNT بعد از دو مرحله ACCB

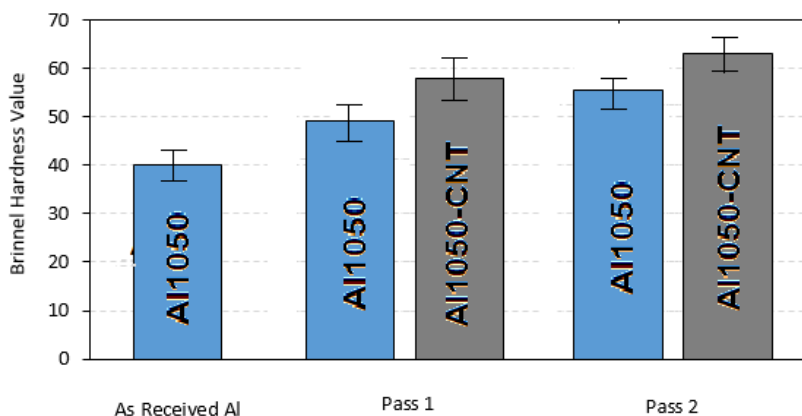


شکل ۵ توزیع اندازه دانه در ریزساختار حاصل از تغییر شکل پلاستیک شدید: الف) آلومینیم ۱۰۵۰ بعد از یک پاس ACCB، ب) کامپوزیت AI-CNT بعد از یک مرحله ACCB، ج) آلومینیم ۱۰۵۰ بعد از دو مرحله ACCB و د) کامپوزیت AI-CNT بعد از دو مرحله ACCB

۳-۲- بررسی سختی نمونه‌ها

سختی برینل نمونه اولیه آلومینیوم ۱۰۵۰ و کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی فرآوری شده به روش اتصال فشاری قالب تجمعی در شکل ۶ نشان داده شده است.

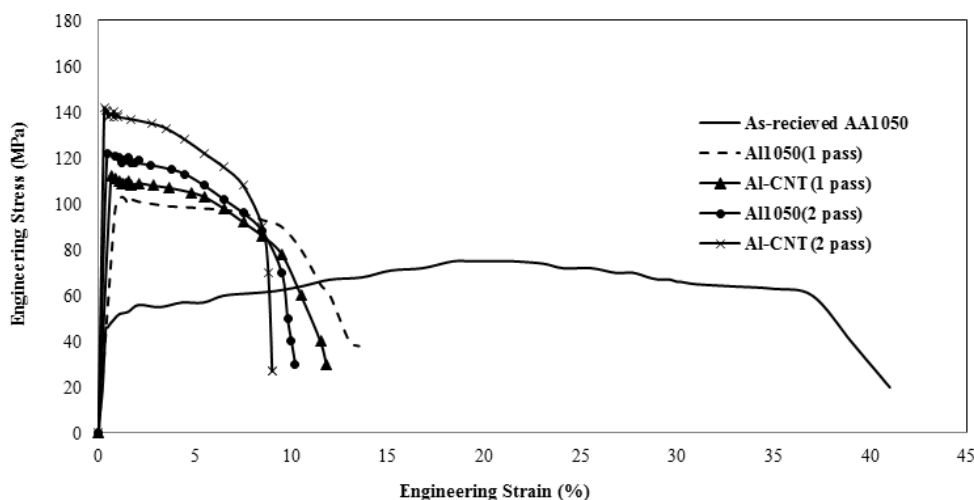
همان‌طور که مشاهده می‌شود سختی آلومینیوم ۱۰۵۰ اولیه کمترین مقدار را دارا می‌باشد. با افزایش تعداد پاس‌های تغییر شکل بر میزان سختی افزوده شده است. این افزایش سختی در پاس اول تغییر شکل بیشتر از افزایش سختی در پاس دوم می‌باشد. این نوع روند افزایش سختی با تعداد پاس‌های تغییر شکل، مختص روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد به طوری که سختی در مراحل اولیه به شدت افزایش می‌یابد و در پاس‌های آخر به یک مقدار ثابت میل می‌کند. در این تحقیق افزایش سختی نمونه بعد از پاس‌های اول و دوم تغییر شکل تحت تاثیر مکانیزم‌های مختلفی اتفاق افتاده است. اولین دلیل افزایش سختی در کامپوزیت‌های فرآوری شده نسبت به نمونه اولیه، اضافه شدن ذرات تقویت کننده CNT می‌باشد. از طرفی در اثر اعمال تغییر شکل پلاستیک شدید و افزایش میزان کرنش پلاستیک با تعداد پاس‌های تغییر شکل، اندازه دانه‌های آلومینیوم زمینه کاهش پیدا کرده و چگالی نابجایی‌ها افزایش پیدا می‌کند که این امر منجر به افزایش سختی نمونه‌ها می‌شود [۲۳، ۲۴].



شکل ۶ سختی آلومینیوم ۱۰۵۰ و کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی فرآوری شده به روش ACCB

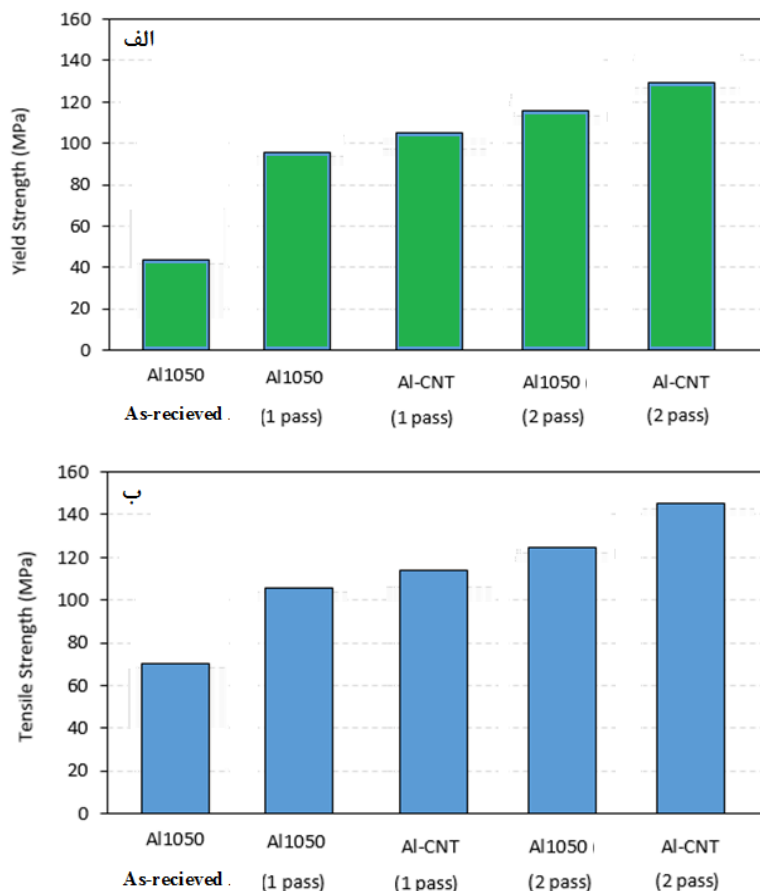
۳-۳- نتایج آزمون کشش

نمودارهای تنش مهندسی-کرنش مهندسی آلومینیوم ۱۰۵۰ و کامپوزیت‌های Al-CNT بعد از فرآوری به روش اتصال فشاری قالب تجمعی در شکل ۷ نشان داده شده است.



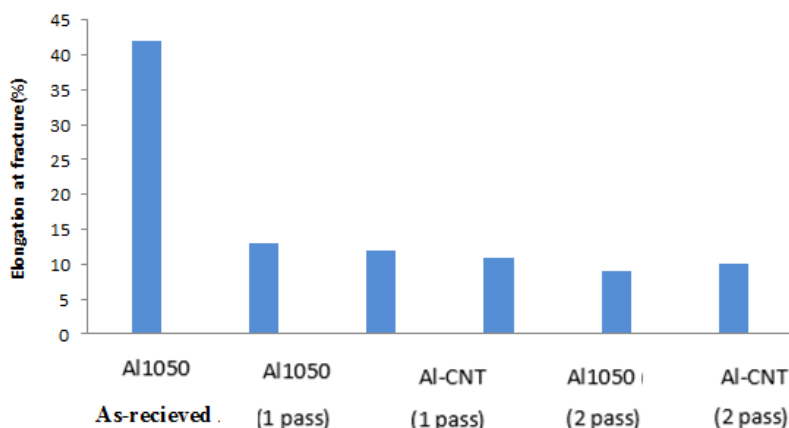
شکل ۷ نمودارهای تنش مهندسی-کرنش مهندسی آلومینیوم ۱۰۵۰ و کامپوزیت‌های Al-CNT بعد از فرآوری به روش ACCB

یکی از نکات مهمی که در این شکل وجود دارد نحوه تغییرات تنش کششی با کرنش اعمالی می‌باشد. دیده می‌شود در همه منحنی‌ها در ابتدا سطح تنش به شدت افزایش یافته و به یک مقدار ماکزیمم که همان استحکام کششی است می‌رسد. بعد از آن سطح تنش به تدریج تا پایان تغییر شکل کاهش می‌یابد. آن چه که از این منحنی‌ها بر می‌آید این است که ناحیه تغییر شکل پلاستیک همگن در مورد آلومینیوم و کامپوزیت‌های فرآوری شده بسیار باریک می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر سه منحنی، تغییر شکل پلاستیک منحنی (تا نقطه ماکزیمم تنش) محدود بوده و بیشتر تغییر شکل پلاستیک به صورت غیرهمگن می‌باشد. محدود بودن ناحیه تغییر شکل پلاستیک همگن نشان دهنده محدود بودن قابلیت کارسختی نمونه‌های آلومینیومی و کامپوزیت‌های فرآوری شده می‌باشد. باید به این نکته اشاره کرد که در مواد آنیل شده که چگالی پایینی از نابعایی‌ها وجود دارد قابلیت کارسختی بالا می‌باشد و در نتیجه ناحیه تغییر شکل پلاستیک همگن در مواد آنیل شده وسیع می‌باشد. به‌طوری که در این ناحیه سطح تنش با افزایش کرنش به تدریج تا تنش ماکزیمم افزایش می‌یابد [۲۳، ۲۴]. محدود بودن قابلیت کارسختی آلومینیوم ۱۰۵۰ و کامپوزیت‌های فرآوری شده در این تحقیق از این عامل نشأت می‌گیرد که هر سه نمونه قبلاً تحت تغییر شکل پلاستیک سرد قرار گرفته‌اند. این نکته حائز اهمیت است که ورق آلومینیوم ۱۰۵۰ مورد استفاده در این تحقیق به روش نورد سرد تولید شده است و کامپوزیت‌ها نیز با روش اتصال فشاری قالب تجمعی که یک فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید است، فرآوری شده‌اند. در نتیجه ساختار نمونه‌های کشش درست قبل از آزمون کشش یک ساختار تغییر شکل یافته با چگالی بالایی از نابعایی‌ها می‌باشد. بنابراین قابلیت کارسختی در این نمونه‌ها پایین می‌باشد و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک همگن که قبل از رسیدن سطح تنش به ماکزیمم مقدار صورت می‌گیرد، محدود است. بنابراین بیشتر تغییر شکل پلاستیک در این نمونه‌ها به صورت غیرهمگن بوده و بعد از وقوع گلوبی شدن اتفاق افتاده است. منحنی‌های تنش-کرنش استحکام کششی و استحکام تسلیم آلومینیوم ۱۰۵۰ زمینه و کامپوزیت‌های فرآوری شده از منحنی‌های تنش-کرنش محاسبه گردیده که در شکل ۸ نتایج آورده شده است.



شکل ۸ الف) استحکام تسلیم، ب) استحکام کششی آلومینیوم ۱۰۵۰ و کامپوزیت‌های فرآوری شده به روش ACCB

دیده می‌شود استحکام کششی و استحکام تسلیم کامپوزیت‌ها نسبت به آلومینیوم ۱۰۵۰ بالاتر بوده و همچنین با افزایش پاس‌های تغییر شکل، استحکام کششی و تسلیم هر دو افزایش می‌یابند. افزایش استحکام کامپوزیت‌ها و آلومینیوم ۱۰۵۰ به دلایل مختلفی اتفاق افتاده است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود. اولین دلیل افزایش استحکام در کامپوزیت‌ها نسبت به آلومینیوم زمينه، حضور ذرات تقویت کننده CNT می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بعد از اعمال یک پاس از فرایند تغییر شکل استحکام کامپوزیت نسبت به زمينه آلومینیوم مقدار کمی افزایش یافته است. این افزایش کم در سطح استحکام می‌تواند به دلیل ایجاد اتصال ضعیف بین زمينه و ذرات تقویت کننده باشد. دلیل افزایش استحکام کامپوزیت فراوری شده با اعمال دو مرحله از فرایند اتصال فشاری قالب تجمعی نسبت به کامپوزیت فراوری شده با اعمال تنها یک مرحله از فرایند، اعمال تغییر شکل پلاستیک بیشتر و همچنین درصد حجمی بالاتری از ذرات تقویت کننده می‌باشد. همان‌طور که دیده می‌شود، در اثر اعمال تغییر شکل در دمای پایین چگالی نابی‌ها در زمينه افزایش می‌یابد [۲۵]. دومین عامل در افزایش استحکام، کاهش اندازه دانه‌های زمينه با افزایش تعداد پاس‌ها می‌باشد [۲۶]. عامل مهم دیگر که بر استحکام تاثیر دارد افزایش استحکام پیوند بین ذرات تقویت کننده و زمينه با افزایش میزان تغییر شکل اعمالی می‌باشد. فصل مشترک‌های ضعیف بین ذرات تقویت کننده و زمينه حاصل از پاس اول تغییر شکل در اثر اعمال تنش‌های فشاری در حین انجام پاس دوم تغییر شکل می‌تواند تقویت شود. در شکل ۹ تغییرات درصد ازدیاد طول به صورت تابعی از تعداد پاس‌های تغییر شکل آورده شده است.



شکل ۹ تغییرات درصد ازدیاد طول در حین آزمون کشش با تعداد پاس‌های تغییر شکل در مورد آلومینیوم ۱۰۵۰ و کامپوزیت‌های فراوری شده

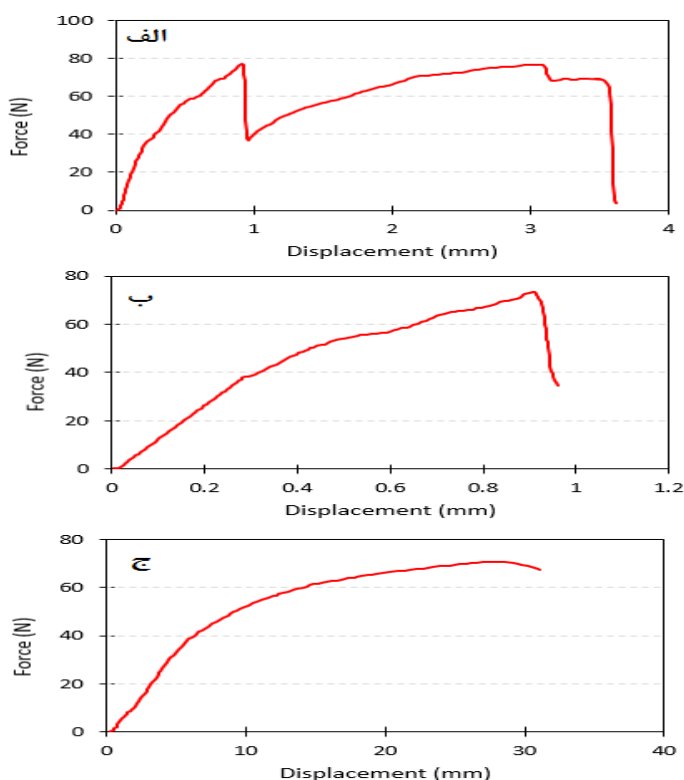
در مورد مواد مختلف معمولاً با افزایش استحکام و سختی از میزان درصد ازدیاد طول در حین آزمون کشش کاسته می‌شود. مهمترین عامل در کاهش درصد ازدیاد طول حضور ذرات تقویت کننده می‌باشد. فصل مشترک بین ذرات تقویت کننده و زمينه، محل مناسبی برای جواهرزنی و رشد ترک‌ها در حین تغییر شکل می‌باشد. ترک‌های ایجاد شده در فصل مشترک تحت تنش‌های کششی سه بعدی رشد کرده و موجب شکست کامپوزیت می‌شوند.

۳-۴- آزمون استحکام پیوند لایه‌ها

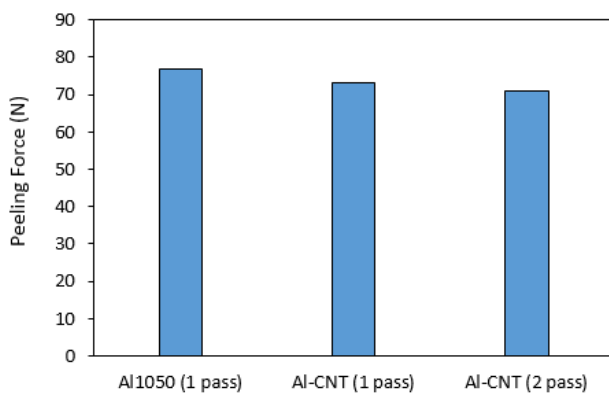
برای بررسی کیفیت اتصال بین لایه‌های کامپوزیت از آزمون لایه‌کنی^۱ استفاده شده است. به این منظور قسمتی از لایه‌های نمونه‌های کامپوزیت از هم جدا شده و برای بررسی کیفیت اتصال، این لایه‌ها با استفاده از دستگاه کشش کشیده شدند و تغییرات نیروی لایه‌کنی به صورت تابعی از جابجایی فک‌های دستگاه کشش به دست آمدند. شرایط آزمون لایه‌کنی بر اساس استاندارد ASTM D1876 آماده‌سازی گردید. در شکل ۱۰ این منحنی‌ها برای آلومینیوم ۱۰۵۰ و کامپوزیت‌های فراوری شده نشان داده شده است. در مورد آلومینیوم ۱۰۵۰ مطابق با شکل ۱۰-الف در ابتدا سطح نیرو افزایش یافته و سپس به طور ناگهانی کاهش می‌یابد. بعد از این کاهش دوباره سطح نیرو افزایش یافته و در نهایت به دلیل جدایش لایه‌ها در پایان فرایند کشش به صفر می‌رسد. کاهش ناگهانی

¹ Peel Test

سطح نیرو در میانه فرایند می‌تواند به دلیل وجود عدم چسبندگی موضعی بین لایه‌ها باشد. در مورد کامپوزیت‌های Al-CNT طبق شکل ۱۰ (ب و ج) سطح نیرو به طور پیوسته افزایش یافته و با جدایش لایه‌ها در انتهای فرایند کشش کاهش می‌یابد. مقدار ماکزیمم نیرو در این منحنی‌ها به عنوان نیروی لایه‌کنی در نظر گرفته می‌شود. تغییرات نیروی لایه‌کنی برای آلومینیوم ۱۰۵۰ و کامپوزیت‌های Al-CNT در شکل ۱۱ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود چسبندگی بین لایه‌ها در آلومینیوم ۱۰۵۰ فرآوری شده به روش اتصال فشاری قالب تجمعی بیشتر از چسبندگی بین لایه‌ها در کامپوزیت‌های Al-CNT می‌باشد. کاهش چسبندگی بین لایه‌ها به دلیل اضافه شدن تقویت کننده‌های CNT مابین لایه‌ها می‌باشد. از طرفی مشاهده می‌شود در مورد کامپوزیت‌های فرآوری شده با افزایش تعداد سیکل‌های تغییر شکل اتصال بین لایه‌ها ضعیف‌تر می‌شود. این کاهش استحکام پیوند به دلیل کارسخت تر شدن زمینه آلومینیوم در سیکل‌های بالاتر است. باید به این نکته اشاره کرد که با کارسخت‌تر شدن مواد در اثر تغییر شکل، شکل‌پذیری و در نتیجه چسبندگی بین لایه‌ها کاهش می‌یابد.



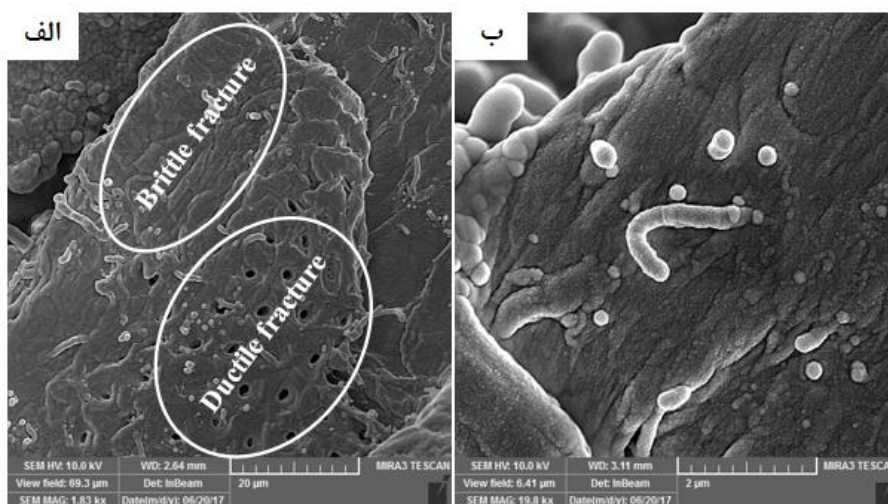
شکل ۱۰ تغییرات نیروی لایه‌کنی به صورت تابعی از میزان جابجایی فک‌های دستگاه کشش: الف) آلومینیوم ۱۰۵۰ بعد از یک مرحله ACCB، ب) کامپوزیت Al-CNT بعد از یک مرحله ACCB، و ج) کامپوزیت Al-CNT بعد از دو مرحله ACCB



شکل ۱۱ نیروی لایه‌کنی آلومینیوم ۱۰۵۰ و کامپوزیت‌های Al-CNT فرآوری شده به روش ACCB.

۳-۵- بررسی سطح شکست کامپوزیت‌های Al-CNT

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست کامپوزیت‌های Al-CNT در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این دو تصویر مربوط به سطوح شکست کامپوزیت‌ها بعد از یک و دو مرحله فرایند اتصال فشاری قالب تجمعی را نشان می‌دهد. در شکل ۱۲-الف که از سطح شکست بعد از اعمال یک مرحله از فرایند گرفته شده است، مناطقی شامل حفرات هم محور مشاهده می‌شود. این مناطق نشان دهنده وقوع شکست نرم با مکانیزم جوانه‌زنی و به هم پیوستن حفرات می‌باشد. از طرفی سطوح کلیواژ نیز در برخی از مناطق مشاهده می‌شود. بنابراین چنین به نظر می‌رسد که ماهیت شکست به صورت ترکیبی از شکست ترد و نرم می‌باشد. همچنین نانولوله‌های کربنی نیز در سطوح شکست مشاهده می‌شوند. در شکل ۱۲-ب تصویر الکترونی روبشی از سطح شکست بعد از اعمال دو مرحله تغییر شکل به روش اتصال فشاری قالب تجمعی و در بزرگ‌نمایی بالاتر مشاهده می‌شود. در این تصویر نانولوله‌های کربنی در سطح شکست کاملاً مشخص می‌باشند. همچنین دیده می‌شود که در نواحی اطراف نانولوله‌های کربنی شکست زمینه به صورت ترد می‌باشد. با بررسی سطوح شکست چنین به نظر می‌رسد که ماهیت شکست با افزایش تعداد پاس‌های تغییر شکل ثابت باقی مانده و به صورت ترکیبی از شکست ترد و نرم می‌باشد. در برخی مناطق، نانولوله‌های کربنی تحت تنش‌های کششی شکسته می‌شوند. این مشاهدات تایید می‌کند که در کامپوزیت‌های فرآوری شده توسط فرایند اتصال فشاری قالب تجمعی، نانولوله‌ها نقش افزایش قدرت را ایفا می‌کنند.



شکل ۱۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست کامپوزیت‌های Al-CNT: الف) بعد از اعمال یک مرحله ACCB و ب) بعد از اعمال دو مرحله ACCB

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، نانوکامپوزیت با فاز زمینه آلومینیوم ۱۰۵۰ با ذرات تقویتی CNT با استفاده از روش تغییر شکل پلاستیک شدید اتصال فشاری قالب تجمعی تولید شدند و ریزساختار و خواص مکانیکی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج اصلی به شرح زیر است:

- ۱- اندازه متوسط دانه‌های زمینه آلومینیوم ۱۰۵۰ در کامپوزیت‌های تولید شده بعد از یک و دو پاس از فرایند اتصال فشاری قالب تجمعی به ترتیب ۷ و ۴ میکرومتر می‌باشد. اندازه دانه نمونه‌های آلومینیوم ۱۰۵۰ بدون افزودن CNT بعد از یک و دو پاس از این فرایند به ترتیب ۸ و ۶ میکرومتر می‌باشد که بالاتر از اندازه دانه‌های به دست آمده در کامپوزیت‌های Al-CNT است.
- ۲- اضافه شدن ذرات تقویت کننده CNT و افزایش میزان کرنش پلاستیک با تعداد پاس‌های تغییر شکل منجر به افزایش سختی، افزایش استحکام کششی تسلیم و حداکثر و همچنین کاهش انعطاف‌پذیری نمونه‌ها گردید.
- ۳- اضافه شدن تقویت کننده‌های CNT مابین لایه‌ها موجب کاهش چسبندگی بین لایه‌ها گردید. در کامپوزیت‌های فرآوری شده با افزایش تعداد سیکل‌های تغییر شکل به دلیل کارسخت تر شدن زمینه آلومینیوم اتصال بین لایه‌ها ضعیف‌تر شد.

References

- [1] Estrin Y, Vinogradov A. Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science. *Acta materialia*. 2013 Feb 1;61(3):782-817. doi: [10.1016/j.actamat.2012.10.038](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.10.038)
- [2] Lowe TC, Valiev RZ. The use of severe plastic deformation techniques in grain refinement. *Jom*. 2004 Oct;56:64-8. doi: [10.1007/s11837-004-0295-z](https://doi.org/10.1007/s11837-004-0295-z)
- [3] Umemoto M. Nanocrystallization of steels by severe plastic deformation. *Materials Transactions*. 2003;44(10):1900-11. doi: [10.2320/matertrans.44.1900](https://doi.org/10.2320/matertrans.44.1900)
- [4] Horita Z, Fujinami T, Nemoto M, Langdon TG. Equal-channel angular pressing of commercial aluminum alloys: Grain refinement, thermal stability and tensile properties. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2000 Mar;31:691-701. doi: [10.1007/s11661-000-0011-8](https://doi.org/10.1007/s11661-000-0011-8)
- [5] Sakai G, Horita Z, Langdon TG. Grain refinement and superplasticity in an aluminum alloy processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering: A*. 2005 Feb 25;393(1-2):344-51. doi: [10.1016/j.msea.2004.11.007](https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.11.007)
- [6] Huang X, Tsuji N, Hansen N, Minamino Y. Microstructural evolution during accumulative roll-bonding of commercial purity aluminum. *Materials Science and Engineering: A*. 2003 Jan 15;340(1-2):265-71. doi: [10.1016/S0921-5093\(02\)00182-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00182-X)
- [7] Peng K, Su L, Shaw LL, Qian KW. Grain refinement and crack prevention in constrained groove pressing of two-phase Cu-Zn alloys. *Scripta Materialia*. 2007 Jun 1;56(11):987-90. doi: [10.1016/j.scriptamat.2007.01.043](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.01.043)
- [8] Jafarzadeh H, Babaei A. Tube reversing and extrusion (TRE) as a novel method for producing UFG thin tubes. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2017 May;70(4):979-88. doi: [10.1007/s12666-016-0889-5](https://doi.org/10.1007/s12666-016-0889-5)
- [9] Jafarzadeh H, Abrinia K. Computation on continuous grain refinement in AA1050 aluminum during repetitive tube expansion and shrinking technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2018 Apr;232(4):307-18. doi: [10.1177/1464420715625086](https://doi.org/10.1177/1464420715625086)
- [10] Babaei A, Jafarzadeh H, Esmaeili F. Tube twist pressing (TTP) as a new severe plastic deformation method. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2018 Mar;71:639-48. doi: [10.1007/s12666-017-1196-5](https://doi.org/10.1007/s12666-017-1196-5)
- [11] Shalchi E, Jafarzadeh H, Hashemi G. Numerical and experimented study of UFG pure copper with high strength processed by Accumulative compound extrusion (ACE). *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 May 21;7(3):42-51. [In Persian]
- [12] Ebrahimzadeh S, Jafarzadeh H. The influences of radial-forward-backward extrusion on the microstructure and mechanical evolution of AM60 magnesium alloy by experimental and finite element micromechanical based cellular automaton approach. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Nov 21;7(9):25-41. [In Persian]
- [13] Alizadeh M. Comparison of nanostructured Al/B4C composite produced by ARB and Al/B4C composite produced by RRB process. *Materials Science and Engineering: A*. 2010 Dec 15;528(2):578-82. doi: [10.1016/j.msea.2010.08.093](https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.08.093)
- [14] Li Y, Langdon TG. Equal-channel angular pressing of an Al-6061 metal matrix composite. *Journal of materials science*. 2000 Mar;35:1201-4. doi: [10.1023/A:1004740504619](https://doi.org/10.1023/A:1004740504619)
- [15] Tokunaga T, Kaneko K, Horita Z. Production of aluminum-matrix carbon nanotube composite using high pressure torsion. *Materials Science and Engineering: A*. 2008 Aug 25;490(1-2):300-4. doi: [10.1016/j.msea.2008.02.022](https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.02.022)
- [16] Nasresfahani MR, Shamanian M. Development and characterization of Al/MWCNT-Al2O3 hybrid composite by accumulative roll bonding. *Journal of Materials Science*. 2018 Aug;53(15):10812-21. doi: [10.1007/s10853-018-2372-7](https://doi.org/10.1007/s10853-018-2372-7)
- [17] Moghadam AD, Omrani E, Menezes PL, Rohatgi PK. Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and graphene—a review. *Composites Part B: Engineering*. 2015 Aug 1;77:402-20. doi: [S135983681500133X](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.05.033)
- [18] Morovvati MR, Mollaei-Dariani B. The formability investigation of CNT-reinforced aluminum nano-composite sheets manufactured by accumulative roll bonding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018 Apr;95:3523-33. doi: [10.1007/s00170-017-1205-1](https://doi.org/10.1007/s00170-017-1205-1)
- [19] Zare H, Jahedi M, Toroghinejad MR, Meratian M, Knezevic M. Compressive, shear, and fracture behavior of CNT reinforced Al matrix composites manufactured by severe plastic deformation. *Materials & Design*. 2016 Sep 15;106:112-9. doi: [10.1016/j.matdes.2016.05.109](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.109)
- [20] Tabesh A, Ebrahimi G, Ezatpour HR. The investigation and comparison of mechanical properties and microstructure Al/CNT and Al/CNT/Al2O3 copposites produced by mixed accumulative roll bonding. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2018;4(4):464-70. [In Persian]
- [21] Kamikawa N, Furuhashi T. Accumulative channel-die compression bonding (ACCB): A new severe plastic deformation process to produce bulk nanostructured metals. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013 Aug 1;213(8):1412-8. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2013.02.016](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.02.016)

- [22] Babaei A, Jafarzadeh H, Zakeri MV. A new approach for fabrication of bulk MMCs using Accumulative Channel-die Compression Bonding (ACCB). *Journal of Advanced Materials and Processing*. 2014;2:67-74.
- [23] Estrin Y. Dislocation theory based constitutive modelling: foundations and applications. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998 Aug 1;80:33-9. doi: [10.1016/S0924-0136\(98\)00208-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00208-8)
- [24] Hallberg H. Influence of process parameters on grain refinement in AA1050 aluminum during cold rolling. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013 Jan 1;66:260-72. doi: [10.1016/j.ijmecsci.2012.11.016](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2012.11.016)
- [25] Wei W, Wei KX, Fan GJ. A new constitutive equation for strain hardening and softening of fcc metals during severe plastic deformation. *Acta Materialia*. 2008 Oct 1;56(17):4771-9. doi: [10.1016/j.actamat.2008.05.025](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2008.05.025)
- [26] Baker I, Nagpal P, Liu F, Munroe PR. The effect of grain size on the yield strength of FeAl and NiAl. *Acta metallurgica et materialia*. 1991 Jul 1;39(7):1637-44. doi: [10.1016/0956-7151\(91\)90251-U](https://doi.org/10.1016/0956-7151(91)90251-U)