**بررسی روشهای ساخت و خواص مکانیکی کامپوزیتهای زمینه مس تقویت شده با نانو ذرات گرافن**

مریم نظری1\*، شکیبا سعادتمند هاشمی2، حمیدرضا بهاروندی3 ، مرتضی تراب پور۴

|  |  |
| --- | --- |
| 1\*دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی مواد، تهران، ایران | Nazari136311@gmail.com |
| 2دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مواد، تهران، ایران | Sh.Saadatmand96@gmail.com |
| 3دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی مواد، تهران، ایران | baharvandee@yahoo.com |
| ۴دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه بین­المللی امام خمینی(ره)، گروه مهندسی مواد، قزوین، ایران | Morteza.btr@gmail.com |

# چكيده

با توجه به خواص ارزشمند الکتریکی و حرارتی مس، این فلز گرانبها به عنوان یکی از پرکاربردترین مواد در صنایع الکتریکی و حمل و نقل به شمار می رود. تاکنون کارهای تحقیقاتی بسیاری روی بررسی خواص کامپوزیت های تقویت شده با گرافیت، نانو لوله ها و الیاف کربن انجام شده است. ظهور نانو تقویت شونده گرافن به دلیل برخورداری از سطح ویژه بسیار و چگالی کم آن حجم زیادی از تحقیقات را در چند دهه اخیر با موضوع کامپوزیت های مس- گرافن به خود اختصاص داده است. از جمله کاربردهای گرافن می توان به عنوان تقویت کننده در بدنه های هواپیما، ماهواره ها، سازه های سبک و مستحکم اشاره داشت. در گزارش حاضر به بررسی و مرور روش های ساخت، خواص مکانیکی و عوامل ساختاری که رفتار مکانیکی کامپوزیتهای زمینه مس تقویت شده با گرافن را کنترل می کنند می پردازیم.

**کليدواژه­ها:** کامپوزیت، گرافن، مس، خواص مکانیکی

**Investigating manufacturing methods and mechanical properties of   
composites reinforced with graphene nanoparticles**

**Maryam Nazari1\*, Shakiba saadatmand Hashemi2, Hamidreza Baharvandi3 , Morteza Torabpour4**

|  |  |
| --- | --- |
| 1\*M.Nazari, Faculty of material & Manufacturing Technologies, Maleke Ashtar University of Technology, Tehran, Iran | Mnazari1363@Mut.ac.ir |
| 2M.Sh.SaadatmandHashemi,Material Engineering Department, Sharif university of Technology, Tehran,Iran | Sh.Saadatmand96@gmail.com |
| 3 H.R. Baharvandi,Faculty of material & Manufacturing Technologies, Maleke Ashtar University of Technology, Tehran, Iran | baharvandee@yahoo.com |
| 4M.Torabpour,Material Engineering Department, Imam Khomeini International University.Qazvin,Iran | Morteza.btr@gmail.com |
|  |  |

**Abstract**

Due to the valuable electrical and thermal properties of copper, this precious metal is considered as one of the most widely used materials in the electrical and transportation industries. So far, many research works have been carried out on investigating the properties of composites reinforced with graphite, nanotubes and carbon fibers. The emergence of nano-reinforced graphene due to its high specific surface area and low density has led to a large amount of research in the last few decades. The issue of copper-graphene composites is reserved for itself. Among the applications of graphene, it can be mentioned as a reinforcement in aircraft bodies, satellites, light and strong structures. In this report, we review the manufacturing methods, mechanical properties and structural factors that influence the mechanical behavior of copper-based composites reinforced with We control graphene.

**Keywords:** Composite , graphene , copper , Mechanical properties

**۱-مقدمه**

گرافن ، یک تک لایه از پیوند اتم های کربن هیبرید شدهمی باشد که در یک شبکه دو بعدی با ساختار شش ضلعی (لانه زنبوری) مرتب شده است[1, 2].

گرافن به دلیل برخورداری از خواص الکتریکی دارای شاخصه ،حرارتی و مکانیکی (مدول یانگ و استحکام کششی منحصر به فرد،توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. تاریخچه ی آن به سال 2004 باز می گردد، زمانی که اولین بار توسط گیم و نووسلوف با لایه برداری مکانیکی کریستال های گرافیت با استفاده از روش نوار چسب جدا شد و جایزه نوبل 2010 فیزیک را به خود اختصاص داد]۳-۵[.

حجم زیادی از گرافن از تجزیه گرافیت به لایه های تشکیل دهنده‌ی آن با استفاده از روش التراسونیک و برشی تولید می شود. از روش الکتروشیمیایی نیز می توان برای جدا کردن لایه های گرافیت استفاده کرد. تولید نانو صفحات گرافن که شامل 10 تا 30 لایه گرافن می باشد ، ساده تر از گرافن تک لایه یا چند لایه است. نانو پلاکت های گرافن معمولاً با استفاده از مولکول های اسید یا فلزات قلیایی از گرافیت تهیه می شوند سپس گرافیت منبسط شده را می توان از طریق تابش فراصوت به صورت ورقه هایی تحت عنوان نانو صفحات گرافن لایه برداری کرد[6-8].

صفحات اکسید گرافن به روش هامرز از اکسید گرافیت استخراج می شود[9]. اکسیدگرافیت معمولا با گروه های اپوکسی و هیدروکسیل در سطح پایه و گروه های کربوکسیل در لبه های آن فعال می شود. اکسید گرافیت را می توان به طور کامل لایه برداری کرد سوسپانسیون کلوئیدی حاصل آبی رنگ بوده و شامل ورقه های اکسید گرافن می باشد که با تابش فراصوت تولید می شوند. اکسید گرافن اغلب به عنوان منبع اولیه در ساخت کامپوزیت ها استفاده می شود، زیرا گروه های هیدروکسیل و اپوکسی موجب تسهیل در توزیع می شوند. اکسید گرافن معمولا به دو صورت شیمیایی یا حرارتی احیاء می شود. بدین وسیله بخشی از ساختار گرافن بازیابی شده و در نهایت به عنوان افزودنی در کامپوزیت ها استفاده می شود. نکته قابل توجه اینکه اتم های اکسیژن قرار گرفته روی سطح گرافن در اکسید گرافن و اکسید گرافن کاهش یافته نه تنها منجر به تسهیل توزیع گرافن در زمینه های مس می شود، بلکه اتصال مس/گرافن را که نسبتاً ضعیف است، بهبود می بخشد. با این حال ،گروه های عاملی اکسیژن بر خواص مکانیکی و فیزیکی گرافن تأثیر منفی دارد. تحقیقات نشان می دهد که گرافن دوپ شده دارای رسانایی الکتریکی بالاتری نسبت به گرافن اولیه بوده و حال آن که خواص مکانیکی آن مشابه گرافن اولیه می باشد. بنابراین نظریه کاربرد گرافن دوپ شده جایگزین مناسبی برای اکسید گرافن یا اکسیدگرافن کاهش یافته می باشد، که این مسئله بامشاهده نتایج خواص مکانیکی و فیزیکی قابل تایید است[9-16].

**۲-کامپوزيت های مس تقويت شده با گرافن**

تاکنون مطالعات کمی بر روی کامپوزیت های زمینه فلزی انجام شده است زیرا دسترسی به ساختاری با توزیع یکسان و همگن گرافن در زمینه فلزی دشوار می باشد چرا که تمایل به کاهش سطح انرژی منجر به تشکیل آگلومره و تجمیع ذرات می شود. علاوه بر این، تشکیل پیوند سطحی موثر بین ذرات گرافن با فلزات به دلیل میل ترکیبی ضعیف گرافن با فلزات، دشوار می باشد. از آنجا که مس خاصیت تر شوندگی ضعیفی دارد، گرافن را مرطوب می کند و هیچ واکنشی بین آنها صورت نمی گیرد ، بنابراین تشکیل پیوند کووالانسی امکان پذیر نبوده و نیروی بین مس و گرافن ، یک نیروی چسبندگی ضعیف از نوع واندروالس می باشد. ساختار چروک گرافن نیز می تواند نقش مهمی در تقویت در هم تنیدگی مکانیکی بین گرافن و مس داشته باشد[17].

مس و آلیاژهای آن به دلیل برخوردار از رسانای حرارتی و الکتریکی عالی همچنین پایداری شیمیایی مناسب به طور گسترده ای در مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار می گیرند. با این وجود ، خواص مکانیکی نسبتاً ضعیف آن ها به ویژه در دمای بالا، موجب محدودیت در کاربرد این دسته از مواد می شود[18].

بدین منظور بهترین راهکار جهت دستیابی به استحکام بالاتر ، ایجاد فازهای ثانویه در مس و آلیاژهای آن به منظور ساخت کامپوزیت های زمینه مس می باشد. علاوه بر این ،کامپوزیت سازی تنها روش بهبود مدول یانگ فلزات و آلیاژها می باشد. تقویت کننده هایی مانند اکسیدها یا کاربیدها که معمولا در کامپوزیت های زمینه مس استفاده می شوند ، منجر به بهبود نتایج قابل توجهی در خواص مکانیکی و تریبولوژیکی آن ها شده، اما هدایت الکتریکی و حرارتی را کاهش می دهند. با این وجود، براساس تحقیقات انجام شده بر روی کامپوزیت های تقویت شده با گرافن می توان نشان داد که خواص مکانیکی نهایی بهبود یافته و با حفظ خواص حرارتی و الکتریکی، کامپوزیت نهایی با ساختار یکسان و عملکرد مناسب بدست می آید[17, 19].

**۳-خواص مکانیکی**

تحقیقات نشان می دهد که کامپوزیت های مس/گرافن دارای سختی ، مدول یانگ ، استحکام تسلیم و استحکام کششی بالاتری در دمای اتاق در مقایسه با نمونه های فاقد گرافن می باشند[20-23]. با این حال، نتایج به میزان گرافن در ترکیب، روش ساخت و همچنین به اکسید گرافن کاهش یافته بستگی دارد. با توجه به خواص مکانیکی در دمای بالا، مشخص شد که سختی کامپوزیت مس شامل 5/0درصد وزنی گرافن، تقریباً دو برابر خواص آن در حالت مس خالص در محدوده دمای اتاق تا 600 درجه سانتی گراد می باشد.(شکل1)

نکته قابل توجه این است که سختی کامپوزیت مس- 0.5% وزنی گرافیت تهیه شده با همان فرایند تقریباً مشابه کامپوزیت مس/گرافن بین دما اتاق و 450 درجه سانتی گراد است. با این حال ، در دمای بالاتر از 450 درجه سانتی گراد و نزدیک به مس خالص در 600 درجه سانتی گراد، سختی کامپوزیت گرافیت/ مس سریع تر از کامپوزیت مس/گرافن کاهش می یابد.

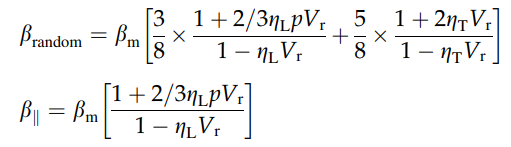
اثرات حضور تقویت کننده گرافن به نحوه انتقال بار از زمینه به تقویت کننده ، کیفیت توزیع ذرات، پیوند سطحی ، وجود نقص ساختاری در گرافن،تعداد لایه های کربنی در گرافن ، وجود نقص در محصول نهایی و جهت گیری گرافن در رابطه با جهت گیری بار اعمالی کنترل می شود. علاوه بر این عوامل متالورژیکی مانند ریزدانه سازی، توزیع یکسان تقویت کننده در زمینه و ایجاد نابجایی نیز به تقویت خواص کامپوزیت های مس/گرافن کمک می کند. دو مدل مختلف میکرومکانیکی از جمله؛ مدل انتقال بار و مدل Halpin-Tsai، که در اصل برای کامپوزیت های تقویت شده با الیاف معمولی توسعه یافته بودند برای پیش بینی افزایش مدول یانگ و تنش تسلیم کامپوزیت های مس/گرافن مورد استفاده قرار گرفتند]۱۷، ۲۴-۳۱[.

روش انتقال بار ساده ترین مدلی است که برای پیش بینی خواص مکانیکی کامپوزیت ها استفاده می شود، در این روش می توان خواص مورد نظر را با استفاده از میانگین وزنی اجزای تشکیل دهنده مانند رابطه زیر محاسبه کرد:

(1)

در این رابطه β مدول یانگ یا استحکام تسلیم ، V کسر حجمی و اندیس های c ، m و r به ترتیب به کامپوزیت ، زمینه و تقویت کننده اشاره می کنند. محدودیت های استفاده از میانگین وزنی اجزای تشکیل دهنده منجر به ایجاد روابطی شده که تاثیر پارامترهای اضافی غیر از ترکیب را درآن مد نظر قرار می دهند.

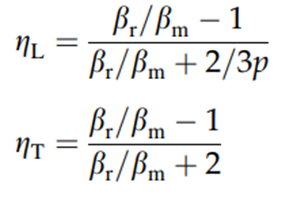
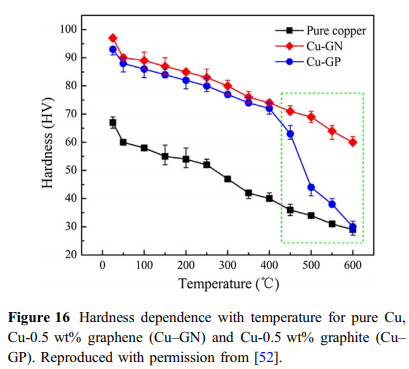
درمدل Halpin -Tsai نه تنها نسبت ابعاد تقویت شونده، بلکه توزیع فضایی آن را نیز در نظر می گیرند. با توجه به توزیع تصادفی یا یک طرفه گرافن در زمینه ، مدل فوق با معادلات تجربی زیر بیان می شود[17].



(۳)

(۲)

که اندیس های random و || به ترتیب به کامپوزیت هایی با گرافن توزیع شده بصورت تصادفی و یک طرفه اشاره دارند ، وفاکتورهای و مطابق روابط زیر تعریف می شوند:



شکل 1: نمودار سختی برحسب دما برای مس خالص ، مس-0.5%وزنی نانوذرات گرافن ومس-0.5%وزنی صفحات گرافن[1]

(۵)

(۴)

**۴-تاثیر ریز ساختار زمینه بر خواص مکانیکی کامپوزیت**

ترکیب گرافن با مس می تواند منجر به ریزدانه سازی در زمینه شود[2, 17, 32-34]. وابستگی تنش تسلیم () بر اندازه دانه (D) عموماً از رابطه هال -پچ پیروی می کند: ]۳۵،۳۶[

(۶)

که σ0 تنش اصطکاک و K شیب نمودار Hall -Petch است که با میزان مقاومت در برابر حرکت نابه جایی ناشی از وجود مرز دانه همراه است.

ریزدانه سازی در کامپوزیت های مس/گرافن به فرآیند آسیاب کاری با گرافن و ذرات اکسید نسبت داده می شود که در نتیجه منجر به تشکیل ذرات بسیار کوچکتر و قفل شدن گرافن یا کاربیدها در مرز دانه ها در طول فرآیند می شود. حضور گرافن نیز می تواند مانع حرکت نابه جایی در حین آزمایش های مکانیکی شود.

با فرض اینکه گرافن توسط نابجایی ها بریده نمی شود ، تنش جریان با تنش مورد نیاز برای خم شدن ذرات گرافن و ایجاد حلقه هایی در اطراف آن ها کنترل می شود، همان طور که توسط اوروان پیشنهاد شده است. می توان تنش تسلیم را از رابطه زیر محاسبه کرد:]۳۷[

(۸)

(۷)

که G مدول برشی زمینه، b مقدار بردار برگرز λ ،k فاصله موثر بین ذرات مسطح،ν ضریب پواسون زمینه، dp  متوسط ​​قطر مسطح ذرات و شعاع اصلی نابجایی ها در زمینه می باشد.

به طور کلی، مکانیزم حلقه اوروان در کامپوزیت های تقویت شده با ذرات ریزتر( نسبت ابعاد کمتر)، بیشتر کاربرد دارد. بنابراین انتظار می رود که سهم کمی را در تقویت کامپوزیت های تقویت شده توسط گرافن به خود اختصاص دهند. علاوه بر این برای استحکام بخشی اوروان، گرافن باید توزیع خوبی در دانه ها داشته باشد، زیرا انتظار نمی رود ذرات موجود در مرز دانه ها به طور موثری حرکت نابجایی ها را در فضای داخلی دانه ها مختل کنند. این مسئله بسیار چالش برانگیز است زیرا در کامپوزیت ها، گرافن تمایل به توزیع در امتداد مرز دانه در اکثر مسیرها دارد. به عنوان مثال، در یک کامپوزیت تولید شده از روش زینتر پلاسمای جرقه ای مقدار کمی نانو صفحات گرافن کروی شکل، اکسید گرافن کاهش یافته یا نانو صفحات گرافن در داخل دانه های مس مشاهده شد.[1, 38-41] با این حال، تنها پس از ترکیب آسیاب کاری و نورد با سرعت بالا، ذرات گرافن با اندازه نانو به صورت متراکم و یکنواخت در داخل دانه ها پراکنده شدند، که مربوط به تنش برشی بزرگی است که در طول فرآیند نورد ایجاد شده است[42].

اگر ذرات گرافن به خوبی وبه طور یکنواخت پراکنده نشوند، گرافن به دلیل دارا بودن هندسه دو بعدی خود می تواند به عنوان یک مانع موثر برای حرکت نابجایی ها عمل کند. در نتیجه، نابجایی هایی که در مرز دانه قرار دارند، در فصل مشترک انباشته شده و باعث افزایش تنش تسلیم می شوند]۲۲،۴۱[.

(1۱)

ثابت شده که این مکانیزم اصلی استحکام بخشی در کامپوزیت های حاوی نانو می باشد که شامل لایه های متناوب مس و گرافن تک لایه است که گرافن به عنوان یک مانع موثر برای انتشار نابجایی ها عمل می کند و یک اثر استحکام بخشی را ارائه می دهد که مقدار آن می تواند بسیار فراتر از پیش بینی مقدار حاصل از رابطه میانگین وزنی اجزای جداگانه باشد. وابستگی تنش تسلیم کامپوزیت ها به چگالی نابجایی در زمینه را می توان به صوربه صورت زیر بیان کرد: ]۴۳[

که یک ثابت عدم تطابق می باشد. نکته قابل توجه اینکه اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین زمینه مس و گرافن باعث کرنش پلاستیک باقی مانده در طول فرآیند می شود، در نتیجه نابه جایی در فصل مشترک تشکیل می شود که چگالی آن توسط: ]۴۴[

(۹)

که A یک ثابت هندسی ،△ C مقدار عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی بین گرافن و زمینه مس و T △ تغییرات دما می باشد.

انباشتگی نابجایی ها در سطح مشترک پس از تسلیم شدن، ناشی از اثر قفل کننده گرافن، منجر به افزایش کارسختی و در نتیجه حداکثر استحکام و سختی در مقایسه با مواد غیر تقویت شده می شود. این نیز به دلیل قفل شدن نابجایی ها توسط یکدیگر می باشد و باعث ایجاد پیچ ​​و تاب می شود، به طوری که برای ادامه تغییر شکل پلاستیک به افزایش تنش نیاز است.

**۵-استحکام بخشی موثر**

استحکام بخشی موثر که به عنوان نسبت میزان افزایش تنش تسلیم در کامپوزیت به زمینه با افزودن مواد تقویت کننده تعریف می شود، می تواند به صورت زیر بیان شود]۳۹،۴۵،۴۶[.

(۱۰)

که σy-c و σy,mبه ترتیب تنش تسلیم کامپوزیت و زمینه هستند. ترکیب فاز تقویت کننده گرافن به صورت حجمی یا کسر وزنی ارائه می شود. رابطه بین کسر حجمی (Vr) و کسر وزنی (Wr) در یک کامپوزیت به شرح زیر است:

که ρrو ρm به ترتیبچگالی تقویت کننده گرافن (2.2 گرم در سانتی متر مکعب) و زمینه مس (8.96 گرم درسانتی متر مکعب ) است.

بررسی و مقایسه خواص مکانیکی از دو دیدگاه نظری و تجربی با افزودن گرافن، نشان می دهد که داده ها به طور کلی فقط درمقادیر با کسر حجمی بسیار پایین حدود (0.1%) نزدیک به میزان واقعی بوده و سپس در مقادیر بالاترحدود1% حجمی از بین می روند این مسئله بویژه در مورد کامپوزیتهای زمینه آلومینیوم و زمینه پلیمری گزارش شده است . دلایل متعددی برای این امر وجود دارد:

**۱.** برخی از داده های تجربی برای کامپوزیت های تقویت شده با اکسید گرافن یا اکسید گرافن کاهش یافته ، که خواص مکانیکی آن ها به دلیل اختلال در ساختار از طریق اکسیداسیون و وجودپیوند sp3 به جای پیوند sp2 ، نسبت به گرافن اولیه پایین تر است. علاوه بر این ، نقص هایی که برای مثال در طول آسیاب کاری در ساختار گرافن وارد می شوند منجر به از بین رفتن خواص ذاتی آن ها و در نتیجه کاهش ظرفیت بارگیری آن ها می شود]۴۷،۴۸[.

**۲.** گرافن ترجیحاً در امتداد جهت بارگذاری در کامپوزیت ها جهت گیری نمی کند و ساختار موج داری از خود نشان می دهد. مقدار در نظر گرفته شده برای محاسبه مقادیر نظری σy-cو σy,m در واقع با تنش تسلیم گرافن مسطح در سطح مطابقت دارد ، که انتظار می رود کمتر از تنش تسلیم خارج از صفحه باشد. این بدان معناست که یک توزیع تصادفی مکانیزم انتقال بار یک طرفه را مختل می کند و کارایی استحکام گرافن را کاهش می دهد و خواص مکانیکی کامپوزیت های مبنی بر گرافن نه تنها با ویژگی های استثنایی درون صفحه ای بلکه با خارج از آن نیز کنترل می شود. به همین دلیل ، استحکام درون صفحه ای گرافن به طور موثری توسط موج های خارج از صفحه کاهش می یابد]۴۹،۵۰[.

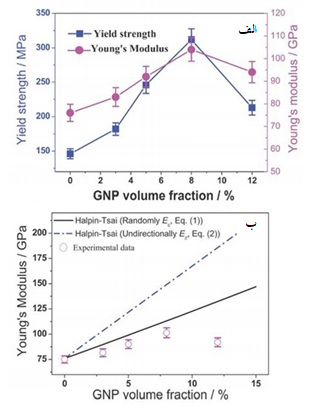
**۳.** فصل مشترک گرافن و زمینه ممکن است ضعیف باشد ، که منجر به انتقال ضعیف تنش می شود. با توجه به حلالیت کم کربن در مس ، تنها قفل مکانیکی بین دو فاز رخ می دهد ، ساختار موج دار گرافن نقش مهمی در افزایش اثر قفل کنندگی دارد. به صورت تجربی تأیید شده است که هیچ واکنشی بین مس و گرافن در حین زینتر کردن حتی در 900 درجه سانتی گراد اتفاق نمی افتد. با این حال ، با اصلاح پودرهای مس یا ورقه‌ای گرافن ، قابلیت تر شدن و در نتیجه پیوند شیمیایی افزایش می یابد[24, 45, 51, 52].

**۴.** عدم توزیع یکسان و مناسب گرافن در زمینه ، به ویژه درمقادیر با کسر حجمی بالا ، که منجر به تجمع می شود. یک توزیع خوب ، نقاط اتصال بسیاری بین گرافن و مس ایجاد می کند. از این رو ،مقادیر بیشتربار را می توان در هنگام تغییر شکل از زمینه گرافن منتقل کرد. علاوه بر این ، توده های گرافن ذاتاً نرم تر هستند و باعث ایجاد ترک ترجیحی در حین تغییر شکل می شوند ، و همچنین در انتقال کمتر بار تاثیر گذارند]۴۵[.

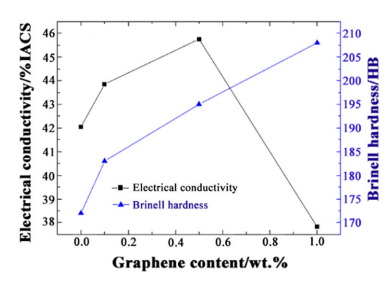
و. کامپوزیت ها ممکن است به دلیل دارا بودن اشکالات ساختاری مانند منافذ و یا تخلخل باعث توزیع بی اثر تقویت کننده در داخل زمینه آلیاژ شوند بنابراین، حضورتقویت کننده بر خواص زمینه آلیاژ غالب نمی شود. منافذ با ایجاد غلظت و تخلخل با ایجاد یک میدان تنش غیر یکنواخت ، باعث می شوند حضور تقویت کننده غیر موثر باشد و بر عملکرد تقویت کننده غلبه کند[53].

**۶-تاثیر میزان گرافن بر خواص مکانیکی کامپوزیت**

با توجه به خواص مکانیکی عالی گرافن همراه با تغییرات ایجاد شده در ریز ساختار زمینه، انتظار می رود که با افزایش میزان گرافن در ترکیب، استحکام و سفتی آن افزایش یابد. در مقایسه با مس تقویت نشده، کامپوزیت های مس/ نانو ذرات گرافن به ترتیب افزایش قابل توجهی در تنش تسلیم و مدول یانگ تا 114% و 37% در ترکیب 8%حجمی نانو ذرات گرافن نشان دادند. همانطور که در شکل( 2-الف) مشاهده می شود ، با افزایش بیشتر ترکیب نانو ذرات گرافن تا %​​12حجمی ، افزایش تنش تسلیم و مدول یانگ به ترتیب به 46% و 24 % کاهش می یابد.



شکل 2:نمودار الف) استحکام و ب) مدول یانگ ،برحسب کسر حجمی نانو ذرات گرافن درکامپوزیت های Cu/GNPs (مقایسه بین داده های تجربی و محاسبات نظری مدول های یانگ)[17].

به دلیل عدم شکل پذیری گرافن، افزودن آن معمولاً در مقایسه با زمینه مس تقویت نشده شکل پذیری کمتری دارد، به ویژه در ترکیبات شامل مقادیر بیشتر گرافن که در آن آگلومره شدن ذرات رخ می دهد میکرو تخلخل ها و فصل مشترک ها به عنوان محل جوانه زایی ترک عمل می کند. بنابراین ، استحکام بخشی در کامپوزیت های مس/گرافن به طور کلی با شکل پذیری صورت می گیرد. این شکل پذیری ممکن است از مورفولوژی چین دار گرافن ناشی شود ،بدین صورت که در حین بارگذاری در زمینه صاف شده، موجب حفظ شکل ماده و یا حتی بهبود شکل پذیری شود.

شکل 3: نمودار تغییرات سختی و هدایت الکتریکی کامپوزیت های گرافن W70Cu30/ برحسب درصد وزنی گرافن[2]

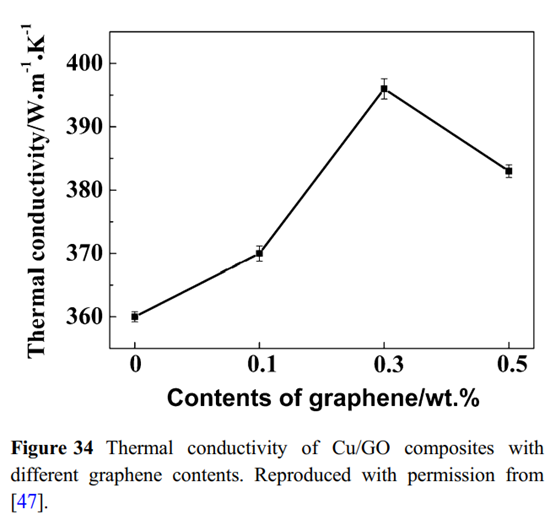
به دلیل اینکه گرافن از رسانایی الکتریکی عالی برخوردار می باشد، از آن به عنوان پرکننده جهت افزایش هدایت الکتریکی مس استفاده می شود. در حقیقت ، بهبود به میزان 20 تا 30 درصد برای فیلم های کامپوزیتی شامل ذرات حاصل از رسوب نشانی الکتریکی مشاهده می شود. تحقیقات نشان می دهد[54, 55] که افزایش هدایت الکتریکی در کامپوزیت های مس/گرافن در مقایسه با آلیاژهای تقویت نشده ، نسبتا متوسط ​​یا حتی منفی است، افزایش مقادیر بستگی به ترکیب گرافن، شرایط ساخت و اکسیدگرافن کاهش یافته دارد. تأثیر ترکیب گرافن بر قابلیت رسانایی الکتریکی برای کامپوزیت های گرافن/ W70Cu30تولید شده توسط آسیاب کاری و زینتر فاز مایع در شکل 3 نشان داده شده است. نمودار شکل3 نشان می دهد که برخلاف سختی ، با افزایش درصد وزنی گرافن ، هدایت الکتریکی ابتدا به تدریج افزایش و سپس به شدت کاهش می یابد.

گرافن دارای هدایت حرارتی بسیار بالا و ضریب انبساط حرارتی بسیار پایین می باشد. هدایت حرارتی یک ورق گرافن (۴۸۴۰ -۵۳۰۰) به طور قابل توجهی بیشتر از فلزات است. علاوه بر این ، گرافن ضریب انبساط حرارتی منفی ، با مقدار را در دمای اتاق نشان می دهد. در این راستا ، ترکیب گرافن می تواند هدایت حرارتی مس را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد و ضریب انبساط حرارتی را کاهش دهد ، به طوری که کامپوزیت های مس/گرافن پتانسیل بالایی برای کاربرد های حرارتی دارند.

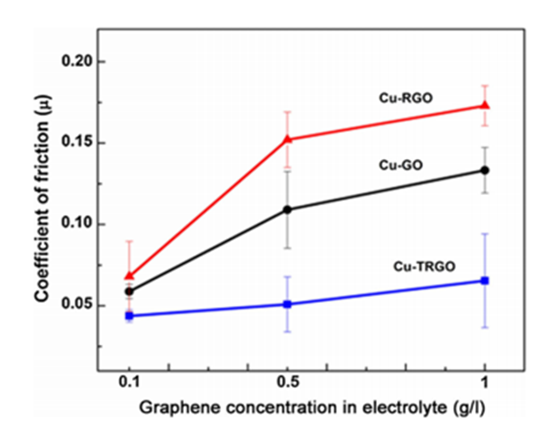
نتایج نشان می دهد که افزایش هدایت حرارتی کامپوزیت های مس/گرافن در مقایسه با مس خالص گاهی نسبتاً کم یا منفی است. چن و همکارانش کامپوزیت مس/ نانو ذرات گرافن را به روش متالورژی پودر و زینتر پلاسمای جرقه ای تولید کردند. نتایج آنها نشان می دهد که با افزایش غلظت گرافن ،هدایت حرارتی میزان قابل توجهی کاهش یافت ، به ویژه هنگامی که ترکیب گرافن بیش از 0.8% حجمی است.

شکل4 نموار هدایت حرارتی کامپوزیت های زینتر شده مس/ اکسید گرافن را برحسب درصد وزنی گرافن نشان می دهد. چنانچه نمودار نشان می دهد افزودن گرافن به زمینه مس می تواند هدایت حرارتی را بهبود بخشد. با افزودن مقادیر کم گرافن رسانایی حرارتی به تدریج افزایش می یابد و به حداکثر خود در 0.3 درصد وزنی اکسید گرافن می رسد. با این حال، برای درصد ترکیب بیشتر گرافن ، هدایت حرارتی به میزان قابل توجهی کاهش می یابد دلیل آن آگلومره شدن و تجمع ذرات گرافن اثبات شده که منجر به از بین رفتن ارتباط بین دانه های مس می شود. علاوه بر این ، منافذ و نقایص در فصل مشترک ها می تواند موجب تماس های مقاومتی سطح شده ، به عنوان مکان هایی برای پراکندگی فونون عمل نماید.

افزودن گرافن به مس به ویژه با افزایش مقدار آن در ترکیب معمولاً منجر به کاهش قابل توجه ضریب اصطکاک می شود . دلیل این مسئله به بازده بالای روان کاری گرافن نسبت داده می شود، زیرا ضریب اصطکاک گرافن فوق العاده کم (0.03) می باشد. در طی فرآیند لغزش، گرافن از کامپوزیت ها خارج شده و یک لایه روان



شکل 4: نمودارهدایت حرارتی کامپوزیت های Cu/GO برحسب میزان گرافن]۵۴[

کننده ایجاد می کند که موجب کاهش اصطکاک بین سطوح می شود. با افزایش ترکیب گرافن، فیلم های غنی از گرافن معمولاً از پیوستگی بیشتر و ضخامت بالاتر برخوردار می شوند در نتیجه کاهش بیشتر ضریب اصطکاک را به دنبال دارند. با این وجود، در برخی موارد شاهد افزایش ضریب اصطکاک با افزایش مقادیر گرافن در ترکیب می باشند(شکل 5)، که دلیل آن مربوط به چسبندگی در لغزش بوده که در اثر وجود بیش از حد لایه های گرافن روی می دهد.

نقش موثر گرافن به عنوان روان کننده جامد یا به عبارت دیگر کاهش ضریب اصطکاک با افزودن گرافن نیز منجر به بهبود مقاومت در برابر سایش در کامپوزیت های مس/گرافن در مقایسه با مس خالص می شود. با این حال ، طبق نظریه آرکارد، افزایش سختی منجر به بهبود مقاومت در برابر سایش می شود. این بدان معناست که میزان سایش نه تنها به ضریب اصطکاک بلکه به استحکام مکانیکی نیز بستگی دارد.

با توجه به خواص تریبولوژیکی عالی نانو ذرات گرافن، از پودرهای کامپوزیت مس/گرافن نیز می توان به عنوان افزودنی در روغن های روان کننده با هدف بهبود خواص تریبولوژیکی استفاده کرد.

مس و آلیاژهای آن به دلیل مقاومت در برابر خوردگی برای کاربردهای مهندسی در صنایع دریایی نیز بسیار مناسب هستند، به طوری که می توانند به عنوان پوشش هایی برای محافظت در برابر خوردگی استفاده شوند. مطالعات خوردگی الکتروشیمیایی در محیط NaCl 5/3% نشان می دهد که کامپوزیت های مس/گرافن نسبت به مس خالص در برابر خوردگی مقاوم تر هستند با این وجود نرخ خوردگی نشان داده شده توسط پوشش های مس/گرافن در مقایسه با پوشش های مس خالص همچنان کمتر می باشد. بنابراین، افزودن گرافن به زمینه مس نه تنها می تواند مقاومت به خوردگی را در حالت رسوب یافته افزایش دهد، بلکه می توان به منظور افزایش مقاومت الکتروشیمیایی در محیط هایی مانند Cl-  کاربرد یابد. افزایش مقاومت در برابر خوردگی با افزایش میزان گرافن را می توان به نفوذ ناپذیری بالای گرافن در یون ها و مولکول های کوچک نسبت داد، که می تواند مانع از انتشار Cu+و O2 در سطح مقطع پوشش و سطح پوشش- الکترولیت شود.

ماهارانا و همکارانش گزارش می دهند که پوشش مس تقویت شده با اکسید گرافن کاهش یافته بر روی یک لایه مس، علاوه بر بهبود مقاومت به خوردگی می تواند مقاومت اکسیداسیون را در مقایسه با یک پوشش مس خالص بهبود بخشد.]۵۵[

شکل 6 رفتار اکسیداسیون گرمایی نمونه هایی با پوشش های مختلف در دمای 406 و 542 درجه سانتی گراد در مجاورت هوا را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، افزایش جرم همه نمونه های پوشش داده شده در حضور اکسید گرافن کاهش یافته به طور قابل توجهی کمتر از پوشش های مس خالص می باشد.چنین تصور می شود که مکانیزم محافظت در برابر اکسیداسیون به دلیل حضور اکسید گرافن کاهش یافته است که به عنوان یک مانع ذاتی در برابر انتشار گازها عمل می نماید.

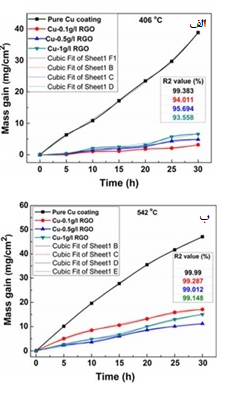
شکل 5: نمودار ضریب سایش پوشش های مختلف مس/ اکسید گرافن ، مس/اکسید گرافن کاهش یافته شیمیایی (RGO) و مس/ اکسید گرافن کاهش یافته حرارتی (TRGO) بر حسب میزان گرافن در الکترولیت.]۵۴[

**۷-فرآیند تولید کامپوزیت های مس/ گرافن**

در سالهای اخیر فرایند های متفاوتی جهت تولید و ساخت کامپوزیت های مس/گرافن ارائه شده است، که هدف از آن بهینه سازی ساختار و خواص کامپوزیت های نو ظهور مس/ گرافن می باشد. مهم ترین مسئله در تمام روش های ساخت، دستیابی به توزیع همگن و یکسان گرافن در زمینه، تشکیل پیوند سطحی قوی و پایداری ساختارگرافن می باشد. از میان روش های مرسوم جهت ساخت، متالورژی پودر و رسوب الکتروشیمیایی موفق ترین روش های ساخت چنین کامپوزیت هایی می باشد. با این حال، سایر روش های ساخت مورد استفاده شامل اسپری سرد، ساخت به صورت لایه به لایه ، نفوذ فلزات ، رسوب الکتروشیمیایی، ترکیب و نورد تجمعی می باشد.]۱۷ [

**۷-۱-متالورژی پودر**

این روش به دلیل سادگی، انعطاف پذیری و قابلیت شکل پذیری، فرآیندی بسیار متنوع برای تولید کامپوزیت های تقویت شده با گرافن می باشد. این فرایند اساساً مخلوط کردن گرافن با پودرهای فلزی خام به منظور آماده سازی ترکیب کامپوزیتی با هدف جلوگیری از آگلومره و خوشه ای شدن ذرات گرافن در محیط های تر (اتانول، استون) یا در حضور اسید استئاریک انجام می شود. سپس ساخت نمونه خام و در نهایت فرایند تراکم کامپوزیت و متراکم سازی شامل زینتر، پرس و یا نورد می باشد[42, 46, 56].

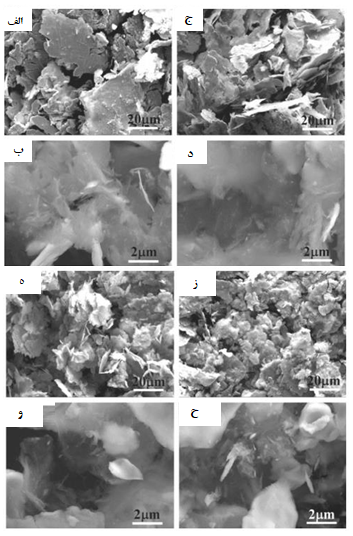


شکل 6: نمودار اکسیداسیون هم‌دمای (افزایش جرم در برابر زمان) نمونه های پوشش داده شده (الف)406 درجه سانتی گراد و ب)542 درجه سانتی گراد.]۴۶[

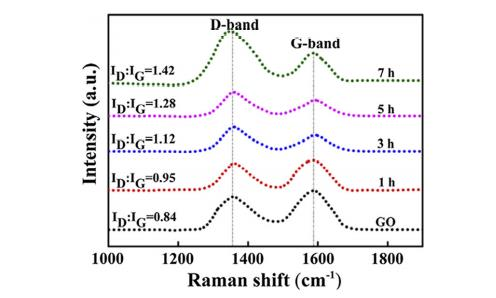
پودرهای کامپوزیتی را می توان با روش های ساده مخلوط کردن شامل هم زدن مکانیکی ، همزن مغناطیسی ، التراسونیک و مخلوط گردابی تهیه کرد. با این حال، فرآیندهای پرانرژی مانند آسیاب کاری یا آلیاژسازی مکانیکی نیز مورد استفاده قرار می گیرد ]۴۲،۴۶،۵۷،۵۸[.

آلیاژسازی مکانیکی می تواند کامپوزیت هایی با ریز ساختارهای بهتر و توزیع بهتر گرافن در زمینه مس تولید کند. با این وجود، جهت حفظ یکپارچگی ساختارگرافن، مراحل فرایند باید با دقت انجام شود. با افزایش زمان آسیاب کاری اندازه پودرهای کامپوزیت کاهش می یابد و موجب بهبود توزیع گرافن می شود، اما احتمال آسیب ساختار ذاتی گرافن افزایش می یابد.

آلیاژسازی مکانیکی می تواند کامپوزیت هایی با ریز ساختارهای بهتر و توزیع بهتر گرافن در زمینه مس تولید کند. با این حال ، برای حفظ یکپارچگی ساختاری گرافن ، مراحل فرایند باید با احتیاط انجام شود. با افزایش زمان آسیاب کاری اندازه پودرهای کامپوزیت کاهش می یابد و پراکندگی گرافن بهبود می یابد ، اما آسیب ساختار ذاتی گرافن ناگزیر افزایش می یابد. شکل ۷ ریز ساخته‌های SEM پودرهای 0.5درصد وزنی اکسیدگرافن بعد از آسیاب کاری را برا ی زمان های مختلف از 1تا ۷ ساعت نشان می دهد. مشاهده می شود که شکل پودرهای مس/ اکسید گرافن با افزایش زمان آسیاب کاری به دلیل اثر برشی گلوله ها تغییر می کند و از مورفولوژی پوسته مانند به شکل دانه ای تغییر شکل می دهد .شکل ۸ طیف های رامان پودرهای کامپوزیت را پس از آسیاب کاری برای زمان های مختلف نشان می دهد. این طیف ها D و Gمعمولی نانو ورق های اکسید گرافن را نشان می دهند که به ترتیب در حدود و واقع شده اند.



شکل ۷ : تصاویر SEMاز پودر GO ٪Cu-0.5 wtپس از آسیاب گلوله ای برای 1ساعت( الف،ب )، 3ساعت(ج،د )،5ساعت(ه،و ) و7 ساعت(ز،ح ) [46].



شکل ۸ طیف های رامان Cu-0.5% wt GOپس از آسیاب گلوله ای برای زمان های مختلف[46]

مشاهده می شود که نسبت با افزایش زمان آسیاب کاری از به افزایش می یابد ،که نشان  
می دهد با افزایش زمان آسیاب کاری میزان آسیب اکسید گرافن افزایش می یابد. با درک اینکه مهمترین مسئله در ساخت کامپوزیتهای تقویت شده با گرافن ، توزیع یکنواخت ذرات و ایجاد پیوند سطحی بین گرافن و زمینه به منظور استحکام بخشی می باشد. گائوت و همکارانش[51] مراحل زیر را به منظور اصلاحات انجام دادند. ابتدا بار سطحی مثبت را با پوشش هگزادسیل تری متیل آمونیوم روی ذرات مس ایجاد کردند بدین ترتیب اکسید گرافن با بار منفی روی سطح پودر مس جذب شده و توزیع همگن و یکنواخت گرافن در کامپوزیت، حاصل می شود.

\*زینتر مایکروویو نسبت به زینتر معمولی به سرعت گرمایش ایجاد می کند و در نتیجه اندازه دانه های بسیار ظریف تری حاصل می شود[20].

\* اکثر محققان از ترکیب پودرها یا پرس کردن با استفاده از پرس گرم استفاده می کنند. این یک روش پرس کاری فشار بالا می باشدکه در دمای زیادی با هدف انجام زینتر رخ می دهد. پرس گرم در شرایطی که کل سیستم در دمای بالا نگه داشته شده، با قرار دادن پودرهای کامپوزیت در قالب مناسب( معمولاً گرافیت) و اعمال فشار تک محوری انجام می شود[17, 46, 57].

\* زینتر پلاسمای جرقه ای که یک روش زینتر نسبتاً جدید می باشد، نیز مورد بررسی قرار گرفت[56, 59, 60].

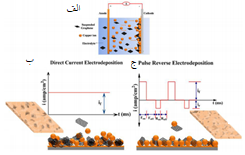
در این فرایند، جریان مستقیم پالسی از قالب گرافیتی عبور می کند که مخلوط پودر یا نمونه ها بصورت تک محوری پرس می شوند. هنگامی که یک جرقه در نقطه تماس بین ذرات یک ماده ایجاد می شود، یک شرایط با درجه حرارت بالا به وجود می آورد که منجر به گرم شدن سریع و در نتیجه افزایش سرعت زینتر می شود، بنابراین رشد دانه، تجمع و آگلومراسیون گرافن می تواند در طول پرس کاری به حداقل برسد. ضریب تراکم موثر را می توان با اعمال ترکیبی از جرقه، اثر فشار، میزان گرمایش و انتشار میدان الکتریکی به دست آورد.

کیم و همکاران[42] پودرهای کامپوزیتی را برای دستیابی به چگالی و توزیع بهتر گرافن در زمینه مس نورد کردند. پودرها آسیاب می شوند و سپس در لوله ای خالص کپسوله شده وعملیات گاز زدایی انجام می شود و سپس تحت نورد با سرعت یکنواخت یا سرعت بالا قرار می گیرند. تمام کامپوزیت های مس و مس تقویت شده بعد از نورد (سرعت یکنواخت و یا سرعت بالا)، چگالی بالایی بین 98.8%تا 99.4% نشان می دهند. این بدین معنی می باشد که پس از نورد تقریباً تراکم کامل حاصل شده است.

**۷-۲-رسوب نشانی الکتروشیمیایی**

روشهای سنتی الکتروشیمیایی نقش موثری در جلوگیری از تجمع ذرات گرافن در زمینه ندارد زیرا گرافن به دلیل تمایل ضعیف به فلز در صورتی که محل اتصال مناسبی وجود نداشته باشد مستعد جدا شدن از ذرات فلزی می باشد لذا به روشهای جدید توزیع ذرات مانند رسوب نشانی الکتروشیمیایی نیاز می باشد. رسوب نشانی را می توان به روشهای با الکترود و فرایندهای رسوب نشانی بدون الکترود تقسیم کرد. از هر دو مورد جهت تولید کامپوزیت مس/گرافن استفاده می شود[61, 62].

در روش الکتروشیمیایی (آبکاری) از یک سلول الکتروشیمیایی و یک منبع تغذیه استفاده می شود که در آن بین آند و کاتد یک جریان برقرار شده و رسوب فیلم کامپوزیت روی سطح کاتد شکل می گیرد. در روش آبکاری بدون الکترود، به منظور ایجاد واکنش در حمام ، به جریان نیازی نیست و اساساً یک فرایند شیمیایی رخ می دهد. تجزیه ترموشیمیایی نمک های فلزی، با آزاد سازی یون های فلزی رخ داده و ترکیب شامل گرافن تشکیل می شود.



شکل ۹: تنظیم تجربی تغییر مکان (الف) و نمایش شماتیک شکل موج های جاری و رسوب همزمان مس و گرافن با جریان مستقیم (ب)و پالس معکوس (ج).]۶۱[

**۷-۳-رسوب بخار شیمیایی**

عدم توزیع مناسب از گرافن در زمینه یاعدم ایجاد پیوند سطحی خوب و یا حتی آسیب به ساختارگرافن موجب می شود از روش های جدیدی مبنی بر پوشش دادن پودرهای مس با گرافن استفاده شود عمده این روش ها رسوب بخار شیمیایی می باشد. این روش ها تا حدودی معایب موجود را حل می کند و علاوه بر این می تواند منجر به ایجاد ساختار مناسب تری از گرافن در درون زمینه فلزی شود.

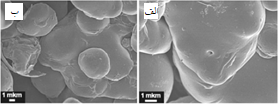
بابل و همکاران کامپوزیت های مس/گرافن سه بعدی را طی مراحل زیر تولید کردند(10): [63]

1. سیال شدن تحت گازهای حاوی هیدروکربن در یک محفظه

2. تجزیه دما بالای هیدروکربن ها که به عنوان منبع کربن عمل می کنند

3. جوانه زنی و رشد ساختارهای کربنی روی سطح پودرهای مس.

با این روش سنتز گرافن بر روی پودرهای مس به طور کلی توسط رسوب بخار شیمیایی انجام می شود. گرافن بر روی سطح میکرونی پودر مس به روش رسوب بخار شیمیایی با استفاده از اتیلن به عنوان منبع کربن در محدوده دمایی از 700 تا 940 درجه سانتی گراد سنتز شد. سپس پودرهای کامپوزیتی سنتز شده با مقدار معینی از ذرات مس ساده مخلوط شدند و برای به دست آوردن مواد فشرده، مخلوط و در دو مرحله تحت نورد گرم قرار گرفت و ضخامت کلی آن 70 درصد کاهش یافت. شکل10 تصاویر SEM از پودر مس که در دمای 890 و 940 درجه سانتی گراد در حضور اتیلن تهیه شده را نشان می دهد. اندازه دانه در نمونه های ساخته شده حدود mµ7 می باشد که در جهت نورد با لایه های ظریف کربنی که در اطراف مرزها وجود دارند، کشیده شده است.

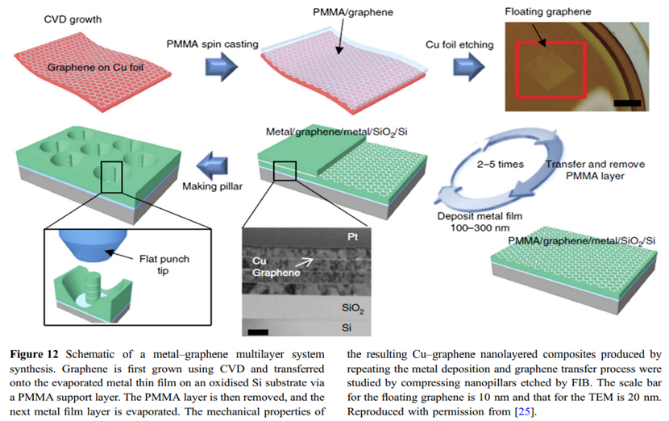


شکل ۱۰:ذرات پودر مس در حضور اتیلن در دمای (الف) 890 درجه سانتی گراد و (ب) ۹۴۰ درجه سانتی گراد، زینتر می شوند.]۶۳[

**۷-۴-ساخت به صورت لایه لایه**

اگرچه این روش از تنوع بسیاری برخوردار می باشد اما روش زمان بر بوده و از آن جهت کامپوزیت های لایه نازک شامل لایه های متناوب مس گرافن تک لایه با فاصله لایه های متناوب 70-200 نانومتر استفاده شد که مراحل آن به صورت شماتیک در شکل ۱۱ نشان داده شده است[64].

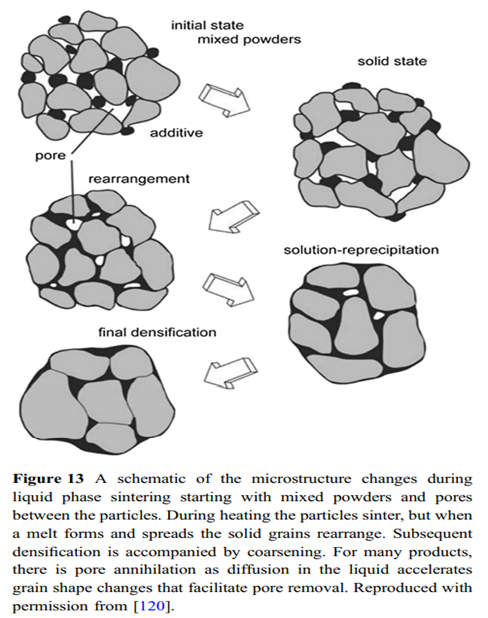
ابتدا، لایه تک اتمی گرافن را بر روی یک فویل به ضخامت 25 µm با روش رسوب بخار شیمیایی رشد می دهند. سپس گرافن به لایه رسوب مس منتقل می شود تا ساختارهای چند لایه فلز -گرافن ایجاد شود.



شکل ۱۱: شماتیک سنتز سیستم چند لایه فلز -گرافن گرافن ابتدا با استفاده از CVD رشد می کند و بر روی لایه نازک فلز تبخیر شده بر روی یک لایه اکسید شده Si از طریق یک لایه پشتیبانی PMMA منتقل می شود. سپس لایه PMMA برداشته می شود و لایه بعدی فیلم فلزی تبخیر می شود. خواص مکانیکی کامپوزیت های نازک مس/گرافن حاصل از تکرار رسوب فلزی و انتقال گرافن با فشرده سازی نانو ستون های حک شده توسط FIB مورد مطالعه قرار گرفت. نوار مقیاس گرافن شناور 10 نانومتر و برای TEM ۲۰ نانومتر است[64]

**۷-۵-فرآیند نفوذ فلزی**

نفوذ فلزی یک فرایند متالورژی مایع شامل نفوذ فلز مذاب به درون یک ماده پیش ساخته می باشدکه این مواد به دلیل عدم حلالیت با روش دیگری قابلیت تولید ندارند. پیش ساخته تنگستن- گرافن و نفوذ مذاب مس به درون آنها یکی از مثالهای کاربردی این روش می باشد که نفوذ دهی در این روش بدون اعمال فشار رخ می دهد. این روش در به دست آوردن آلیاژهای متراکم مس-تنگستن با توزیع همگن تنگستن و مس بسیار موثر است. در واقع ترکیب ماده پیش ساخته توسط فرایند آسیابکاری بدست آمده سپس ماده دوم ذوب شده به درون پیش فرم ساخته شده نفوذ داده می شود با این حال ، برخی از اشکالات این فرآیند شامل احتمال آسیب تقویت کننده ، اندازه درشت دانه ها، تماس بین ذرات تقویت کننده و واکنش های سطحی نامطلوب می باشد. همچنین مشخص شد که هنگام زینتر، ساختار کریستالی گرافن به شدت آسیب دیده است[65].



شکل ۱۲: شماتیک ساختار در طول پخت، فاز مایع با پودرها و منافذ بین ذرات در حین گرم شدن مخلوط می شود ، اما هنگامی که ذوب شکل می گیرد و پخش می شود دانه های جامد دوباره مرتب می شوند. تراکم بعدی با درشت شدن ذرات همراه است. در بسیاری از موارد ، از بین رفتن منافذ رخ می دهد زیرا انتشار مایع تغییرات شکل دانه را تسریع می بخشد که حذف منافذ را به دنبال خواهد داشت]۶۵[.

**۷-۶-اسپری سرد**

یک روش نسبتاً جدید است که در آن پودرهای کامپوزیتی در دمای پایین با سرعت های بسیار بالا (ms-1500–1200) اسپری می شوند و بر روی یک زیر لایه (سطح) می نشیند. در طی این فرآیند ، پودرها همراه با با جریان گاز در یک نازل واگرا از نوع De-Laval تزریق شده وشتاب می گیرند. به منظور افزایش سرعت گاز و ذرات،گاز را گرم کرده این عمل جهت کنترل وممانعت از احتراق گاز می باشد. ذرات هنگام برخورد با سطح دچار تغییر شکل پلاستیک شدید می شوند. انرژی جنبشی بالای ذرات هنگام برخورد ، چسبندگی خوب ذرات بر روی سطح را ایجاد می کند. از آنجا که دمای فرایند زیر نقطه ذوب بوده ، از اکسیداسیون و تبدیل فازی ممانعت می شود. تحقیقات نشان داده که تاثیر اسپری سرد همراه با آسیاب کاری در حضور نانو صفحات گرافن غیر متراکم و با توزیع یکنواخت ، به مراتب در ساخت پوشش های مس بیشتر است[66, 67].

**۷-۷-نورد تجمعی**

یکی دیگر از روش های ساخت مواد که در آن تغییر شکل پلاستیک شدید همراه با فرایند برش ، اتصال و نورد همراه می باشد نورد تجمعی نام دارد در این روش کرنش های بسیار با میزان قابل توجهی در مواد و ساختار ذخیره می شود وساختار بهسازی شده بدست می آید. در نتیجه ، خواص مکانیکی خوبی در دماهای پایین و بالا برای فلزات و آلیاژهای مختلف نسبت به نمونه های با ساختار درشت دانه مشاهده می شود. در برخی از گزارشات از نورد تجمعی به منظور تولیدکامپوزیت های تقویت شده با ذرات استفاده شده است. نتایج نشان می دهد توزیع دستی ذرات یا بین دو نوار فلزی قبل از هر مرحله نورد ، کامپوزیت های زمینه آلومینیوم یا مس را با ویژگی های توزیع عالی ذرات تقویت کننده ، پیوند سطحی خوب و بدون تخلخل پس از چندمرحله نورد تجمعی را به دست می آورد[68, 69].

**۸-نتیجه گیری**

بررسی ها نشان می‌دهد با توجه به خواص کامپوزیت های تولید شده تقویت کننده گرافن به عنوان مواد با مقاومت بالا ، چگالی کم و رسانایی خوب بررسی ها نشان می دهد هنوز این دسته از کامپوزیت ها هنوزمحصول تجاری نداشته وبرنامه تولید انبوه ندارند. با این حال ، پتانسیل بالقوه ای برای این دسته از مواد وجود دارد. صنایع برق و ساختمان بزرگترین مصرف کنندگان مس هستند و آلیاژهای آن نیز در صنایع الکترونیکی و حمل و نقل کاربرد دارد. افزایش برخی از خواص با افزودن گرافن به بهبود عملکرد برخی از محصولات فعلی کمک شایانی می کند. به عنوان مثال ، فیلم های کامپوزیتی مس/گرافن می توانند برای کاربردهای با رسانایی الکتریکی و حرارتی بالا همراه با ضریب اصطکاک و سایش پایین استفاده شوند[70].

علاوه بر این ، استحکام و سفتی بالاتر و ضریب انبساط و چگالی حرارتی پایین همراه با هدایت الکتریکی و حرارتی خوب ، کامپوزیت های مس/گرافن را به عنوان موادی با خواص حرارتی مناسب جهت دستگاه های میکروالکترونیکی یا تماس های الکتریکی پیشنهاد می کند[19]. همچنین نشان داده شده است که افزودنی های گرافن می توانند پایداری قوس آلیاژهای مس-تنگستن را بهبود بخشند و عمر مقاومت قوس آلیاژ مس-تنگستن را افزایش دهند[71]. این بدان معناست که کامپوزیت های گرافن/ مس-تنگستن می توانند به عنوان مواد تماس برای سوئیچ های طولانی مدت در کاربردهای فشار بالا عمل کنند.

روان کننده های مایع و گریس معمولاً به دلیل مشکلات زیست محیطی در سیستم های تریبولوژیکی نامطلوب می باشند. اثر اصطکاک و کاهش سایش هیبریدهای گرافن/ نانو ذرات مس به عنوان مواد افزودنی منجر به کاهش مقدار مورد نیاز می شود. علاوه بر این، روان کننده ها خواص خوب کامپوزیت های مس/گرافن یا امکان جایگزینی استفاده از روان کننده های مایع برای پوشش های روان کننده جامد در این سیستم ها را فراهم می کند ، که علاوه بر این عملکرد ، دوام خوبی را نیز فراهم می کند. روانکاری ذاتی گرافن با افزودن آن به فلزات در تماس و سایش ، نیاز به پوشش را نیز برطرف می کند[72, 73].

یکی از مشکلات فولادها در صنعت موضوع خوردگی آنها می باشد پوشش دهی از راهکارهای رایج این مسئله می باشد مطالعات صورت گرفته نشان می دهد پوشش های کامپوزیتی مس/گرافن، می تواند ایده مناسبی به منظور محافظت از فولادها در برابر خوردگی در محیط های کلریدی مانند صنایع دریایی، کشتیرانی و سکوهای نفتی باشد علاوه بر این افزایش مقاومت در برابر خوردگی این پوشش ها با ضخامت کمتری در مقایسه با دیگر مواد رخ می دهد و حتی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می باشد[74, 75].

**منابع:**

1. Wang, X., J. Li, and Y. Wang, *Improved high temperature strength of copper-graphene composite material.* Materials Letters, 2016. 181: p. 309-312.

2. Dong, L., et al., *Microstructure and properties characterization of tungsten–copper composite materials doped with graphene.* Journal of Alloys and Compounds, 2017. 695: p. 1637-1646.

3. Balandin, A.A., et al., *Superior thermal conductivity of single-layer graphene.* Nano letters, 2008. 8(3): p. 902-907.

4. Lee, C., et al., *Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene.* science, 2008. 321(5887): p. 385-388.

5. Novoselov, K.S., et al., *Electric field effect in atomically thin carbon films.* science, 2004. 306(5696): p. 666-669.

6. Abdelkader, A., et al., *How to get between the sheets: a review of recent works on the electrochemical exfoliation of graphene materials from bulk graphite.* Nanoscale, 2015. 7(16): p. 6944-6956.

7. Nicolosi, V., et al., *Liquid exfoliation of layered materials.* Science, 2013. 340(6139): p. 1226419.

8. Paton, K.R., et al., *Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids.* Nature materials, 2014. 13(6): p. 624-630.

9. William, S., J. Hummers, and R.E. Offeman, *Preparation of graphitic oxide.* J. Am. Chem. Soc, 1958. 80(6): p. 1339-1339.

10. Adamska, L., et al., *Atomic and electronic structure of simple metal/graphene and complex metal/graphene/metal interfaces.* Physical Review B, 2012. 85(19): p. 195443.

11. Das, S., et al., *Measurements of the adhesion energy of graphene to metallic substrates.* Carbon, 2013. 59: p. 121-129.

12. Khomyakov, P., et al., *First-principles study of the interaction and charge transfer between graphene and metals.* Physical Review B, 2009. 79(19): p. 195425.

13. Vanin, M., et al., *Graphene on metals: A van der Waals density functional study.* Physical Review B, 2010. 81(8): p. 081408.

14. Xu, Z. and M.J. Buehler, *Interface structure and mechanics between graphene and metal substrates: a first-principles study.* Journal of Physics: Condensed Matter, 2010. 22(48): p. 485301.

15. Yoon, T., et al., *Direct measurement of adhesion energy of monolayer graphene as-grown on copper and its application to renewable transfer process.* Nano letters, 2012. 12(3): p. 1448-1452.

16. Zhang, L., et al., *Electronic structure study of ordering and interfacial interaction in graphene/Cu composites.* Carbon, 2012. 50(14): p. 5316-5322.

17. Chu, K. and C. Jia, *Enhanced strength in bulk graphene–copper composites.* physica status solidi (a), 2014. 211(1): p. 184-190.

18. Davis, J.R., *Copper and copper alloys*. 2001: ASM international.

19. Jagannadham, K., *Orientation dependence of thermal conductivity in copper-graphene composites.* Journal of Applied Physics, 2011. 110(7): p. 074901.

20. Ayyappadas, C.a., et al., *An investigation on the effect of sintering mode on various properties of copper-graphene metal matrix composite.* Advanced Powder Technology, 2017. 28(7): p. 1760-1768.

21. Chen, F., et al., *Effects of graphene content on the microstructure and properties of copper matrix composites.* Carbon, 2016. 96: p. 836-842.

22. Chen, Y., et al., *Fabrication of three-dimensional graphene/Cu composite by in-situ CVD and its strengthening mechanism.* Journal of Alloys and Compounds, 2016. 688: p. 69-76.

23. Li, M.X., et al., *Reduced graphene oxide dispersed in copper matrix composites: Facile preparation and enhanced mechanical properties.* physica status solidi (a), 2015. 212(10): p. 2154-2161.

24. Bashirvand, S. and A. Montazeri, *New aspects on the metal reinforcement by carbon nanofillers: a molecular dynamics study.* Materials & Design, 2016. 91: p. 306-313.

25. Davis, J., *ASM specialty handbook.* Aluminum and aluminum alloys, 1993: p. 207-216.

26. Giannopoulos, G.I. and I.G. Kallivokas, *Mechanical properties of graphene based nanocomposites incorporating a hybrid interphase.* Finite Elements in Analysis and Design, 2014. 90: p. 31-40.

27. Hu, Z., et al., *Graphene-reinforced metal matrix nanocomposites–a review.* Materials Science and Technology, 2016. 32(9): p. 930-953.

28. Ibrahim, I., F. Mohamed, and E. Lavernia, *Particulate reinforced metal matrix composites—a review.* Journal of materials science, 1991. 26(5): p. 1137-1156.

29. Ijaola, A.O., R. Asmatulu, and K. Arifa. *Metal-graphene nano-composites with enhanced mechanical properties*. in *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials IX*. 2020. SPIE.

30. Kumar, H.P. and M.A. Xavior, *Graphene reinforced metal matrix composite (GRMMC): a review.* Procedia Engineering, 2014. 97: p. 1033-1040.

31. Sadowski, P., K. Kowalczyk-Gajewska, and S. Stupkiewicz, *Classical estimates of the effective thermoelastic properties of copper–graphene composites.* Composites Part B: Engineering, 2015. 80: p. 278-290.

32. Koltsova, T.S., et al., *New hybrid copper composite materials based on carbon nanostructures.* Journal of Materials Science and Engineering B, 2012. 2(4): p. 240-246.

33. Zhang, D. and Z. Zhan, *Preparation of graphene nanoplatelets-copper composites by a modified semi-powder method and their mechanical properties.* Journal of Alloys and Compounds, 2016. 658: p. 663-671.

34. Zhang, Q., et al., *The effect of submicron-sized initial tungsten powders on microstructure and properties of infiltrated W-25 wt.% Cu alloys.* International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016. 59: p. 87-92.

35. Armstrong, R., *The (cleavage) strength of pre-cracked polycrystals.* Engineering Fracture Mechanics, 1987. 28(5-6): p. 529-538.

36. Orowan, E., *Zur kristallplastizität. i.* Zeitschrift für Physik, 1934. 89(9): p. 605-613.

37. Ardell, A.J., *Precipitation hardening.* Metallurgical Transactions A, 1985. 16(12): p. 2131-2165.

38. Wejrzanowski, T., et al., *Thermal conductivity of metal-graphene composites.* Materials & design, 2016. 99: p. 163-173.

39. Zhang, D. and Z. Zhan, *Strengthening effect of graphene derivatives in copper matrix composites.* Journal of Alloys and Compounds, 2016. 654: p. 226-233.

40. Zhang, D.-d. and Z.-j. Zhan, *Experimental investigation of interfaces in graphene materials/copper composites from a new perspective.* Rsc Advances, 2016. 6(57): p. 52219-52226.

41. Zhang, X., et al., *Facile synthesis and characterization of reduced graphene oxide/copper composites using freeze-drying and spark plasma sintering.* Materials Letters, 2016. 166: p. 67-70.

42. Kim, W., T. Lee, and S. Han, *Multi-layer graphene/copper composites: Preparation using high-ratio differential speed rolling, microstructure and mechanical properties.* Carbon, 2014. 69: p. 55-65.

43. Clyne, T. and P. Withers, *An Introduction to Metal Matrix Composites. CambridgeUniversityPress.* 1995.

44. Arsenault, R. and N. Shi, *Dislocation generation due to differences between the coefficients of thermal expansion.* Materials Science and Engineering, 1986. 81: p. 175-187.

45. Li, M., et al., *Highly enhanced mechanical properties in Cu matrix composites reinforced with graphene decorated metallic nanoparticles.* Journal of materials science, 2014. 49(10): p. 3725-3731.

46. Yue, H., et al., *Effect of ball-milling and graphene contents on the mechanical properties and fracture mechanisms of graphene nanosheets reinforced copper matrix composites.* Journal of Alloys and Compounds, 2017. 691: p. 755-762.

47. Dikin, D.A., et al., *Preparation and characterization of graphene oxide paper.* Nature, 2007. 448(7152): p. 457-460.

48. Suk, J.W., et al., *Mechanical properties of monolayer graphene oxide.* ACS nano, 2010. 4(11): p. 6557-6564.

49. Nicholl, R.J., et al., *The effect of intrinsic crumpling on the mechanics of free-standing graphene.* Nature communications, 2015. 6(1): p. 1-7.

50. Ruiz-Vargas, C.S., et al., *Softened elastic response and unzipping in chemical vapor deposition graphene membranes.* Nano letters, 2011. 11(6): p. 2259-2263.

51. Gao, X., et al., *Mechanical properties and thermal conductivity of graphene reinforced copper matrix composites.* Powder Technology, 2016. 301: p. 601-607.

52. Jiang, R., et al., *Copper–graphene bulk composites with homogeneous graphene dispersion and enhanced mechanical properties.* Materials Science and Engineering: A, 2016. 654: p. 124-130.

53. Ahmad, S., J. Hashim, and M. Ghazali, *Effect of porosity on tensile properties of cast particle reinforced MMC.* Journal of composite materials, 2007. 41(5): p. 575-589.

54. Jagannadham, K., *Volume fraction of graphene platelets in copper-graphene composites.* Metallurgical and Materials Transactions A, 2013. 44(1): p. 552-559.

55. Xie, G., M. Forslund, and J. Pan, *Direct electrochemical synthesis of reduced graphene oxide (rGO)/copper composite films and their electrical/electroactive properties.* ACS applied materials & interfaces, 2014. 6(10): p. 7444-7455.

56. Tang, Y., et al., *Enhancement of the mechanical properties of graphene–copper composites with graphene–nickel hybrids.* Materials Science and Engineering: A, 2014. 599: p. 247-254.

57. Dutkiewicz, J., et al., *Microstructure and properties of bulk copper matrix composites strengthened with various kinds of graphene nanoplatelets.* Materials Science and Engineering: A, 2015. 628: p. 124-134.

58. Varol, T. and A. Canakci, *Microstructure, electrical conductivity and hardness of multilayer graphene/copper nanocomposites synthesized by flake powder metallurgy.* Metals and materials international, 2015. 21(4): p. 704-712.

59. Cui, Y., et al., *Effect of ball milling on the defeat of few-layer graphene and properties of copper matrix composites.* Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2014. 27(5): p. 937-943.

60. Li, W., et al., *Conductive enhancement of copper/graphene composites based on high-quality graphene.* RSC advances, 2015. 5(98): p. 80428-80433.

61. Bakshi, S.R., D. Lahiri, and A. Agarwal, *Carbon nanotube reinforced metal matrix composites-a review.* International materials reviews, 2010. 55(1): p. 41-64.

62. Tjong, S.C., *Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets.* Materials Science and Engineering: R: Reports, 2013. 74(10): p. 281-350.

63. Babul, T., et al., *Thermophysical properties of Cu-matrix composites manufactured using Cu powder coated with graphene.* Journal of Materials Engineering and Performance, 2016. 25(8): p. 3146-3151.

64. Kim, Y., et al., *Strengthening effect of single-atomic-layer graphene in metal–graphene nanolayered composites.* Nature communications, 2013. 4(1): p. 1-7.

65. Xiong, D.-B., et al., *Graphene-and-copper artificial nacre fabricated by a preform impregnation process: bioinspired strategy for strengthening-toughening of metal matrix composite.* Acs Nano, 2015. 9(7): p. 6934-6943.

66. Assadi, H., et al., *Cold spraying–A materials perspective.* Acta Materialia, 2016. 116: p. 382-407.

67. Yin, S., et al., *Novel cold spray for fabricating graphene-reinforced metal matrix composites.* Materials Letters, 2017. 196: p. 172-175.

68. Liu, X., et al., *Fabrication of high-strength graphene nanosheets/Cu composites by accumulative roll bonding.* Materials Science and Engineering: A, 2015. 642: p. 1-6.

69. Tsuji, N., et al., *ARB (Accumulative Roll‐Bonding) and other new techniques to produce bulk ultrafine grained materials.* Advanced Engineering Materials, 2003. 5(5): p. 338-344.

70. Jagannadham, K., *Electrical conductivity of copper–graphene composite films synthesized by electrochemical deposition with exfoliated graphene platelets.* Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena, 2012. 30(3): p. 03D109.

71. Dong, L., et al., *Investigation on arc erosion behaviors and mechanism of W70Cu30 electrical contact materials adding graphene.* Journal of Alloys and Compounds, 2017. 696: p. 923-930.

72. Jia, Z., et al., *Synthesis, characterization and tribological properties of Cu/reduced graphene oxide composites.* Tribology International, 2015. 88: p. 17-24.

73. Li, X., et al., *Synthesis and characterizations of graphene–copper nanocomposites and their antifriction application.* Journal of industrial and engineering chemistry, 2014. 20(4): p. 2043-2049.

74. Kamboj, A., et al., *Morphology, texture and corrosion behavior of nanocrystalline copper–graphene composite coatings.* JOM, 2017. 69(7): p. 1149-1154.

75. Raghupathy, Y., et al., *Copper-graphene oxide composite coatings for corrosion protection of mild steel in 3.5% NaCl.* Thin Solid Films, 2017. 636: p. 107-115.