مقاله

تأثیر ارتعاشات اولتراسونیک بر فعال‌سازی، تحرک و چگالی نابجایی‌ها در مواد فلزی

مرتضی صادقی*
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
mrzsad@aut.ac.ir

امیر عبداله
دانشیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
amirah@aut.ac.ir

علیرضا فلاحی آرزودار
دانشیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
afallahi@aut.ac.ir

رضوان عابدینی
دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی امیرکبیر
rezvanabedini@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۲۵

چکیده

پدیده‌هایی چون امواج فراصوت، مایکروویو، الکترومغناطیس و گرمایی، هر یک براساس ویژگی‌های ذاتی خود، آثار متنوعی بر تمام یا برخی از مواد، اعم از فلزی و غیر فلزی، دارند. امروزه تحقیق دربارهٔ اثر هر کدام از این پدیده‌ها به یکی از چالشی‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی مبدل شده است. در این میان مشاهده می‌شود که ارتعاشات فراصوت آثار مفیدی مانند کاهش نیروهای شکل‌دهی و ماشینکاری در جهت تسهیل فرایندهای ساخت قطعات دارد. بیشتر پژوهش‌هایی که در این زمینه انجام شده است دربارهٔ اثر اعمال ارتعاشات فراصوت بر رفتار تنش - کرنش ماده می‌باشد و در این زمینه کمتر به پدیده‌های فیزیکی و متالورژیکی مؤثر در این مشاهدات پرداخته شده است. در این مقاله به عوامل اثرگذار ارتعاشات فراصوت بر رفتار متالورژیکی مواد پرداخته شده است و اثر و احتمال بروز هر کدام از پدیده‌ها در شرایط و فرایندهای مختلف حین اعمال ارتعاشات مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله مهمترین آثار ارتعاشات فراصوت بر رفتار متالورژیکی مواد می‌توان به افزایش سرعت رشد دانه‌ها، کاهش میزان نابجایی‌ها، کاهش چرخش شبکه‌های کریستالی، کاهش تشکیل ریزمرزها و ریزدانه‌ها و افزایش میزان بازیابی و تبلور مجدد مواد اشاره کرد. امواج فراصوت در مواضع ناهمگونی و ناپیوستگی ایجاد حرارت موضعی می‌نمایند و به‌همین دلیل در مواضعی که به‌صورت عادی نابجایی‌ها قفل می‌شوند، به‌علت وجود حرارت موضعی، امکان حرکت و نفوذ نابجایی‌ها از کریستالی به کریستال دیگر و از دانه‌ای به دانهٔ دیگر ممکن شده، با ادغام نابجایی‌های دوقطبی با یکدیگر، از میزان نابجایی‌ها کاسته می‌شود.

واژگان کلیدی: ارتعاشات فراصوت، نرم‌شدگی اکوستیکی، متالورژی، فلزات، نابجایی

۱. مقدمه

از اواسط قرن بیستم، که نخستین تحقیقات دربارهٔ اثر اعمال ارتعاشات اولتراسونیک[1] (فراصوت) بر خواص مواد انجام شد، تاکنون دانشمندان زیادی با انجام تحقیقات گوناگون نظریه‌های ضد و نقیضی دربارهٔ اثر ارتعاشات فرکانس بالا بر خواص مکانیکی و متالورژیکی انواع آلیاژها مطرح کرده‌اند. باوجود مدل‌سازی و آزمایش‌های فراوانی که در زمینهٔ اثر ارتعاشات فراصوت روی مواد انجام شده است، هنوز درک صحیحی از سازوکارهای برهم‌کنش بین امواج فراصوت و نابجایی‌ها، همچنین تغییرات ایجادشده در ریزساختار در مقیاس میکروسکوپی در دسترس نیست. از آثار اعمال ارتعاشات فراصوت به نمونه‌های فلزی - که مورد اتفاق محققان است - می‌توان کاهش تنش تسلیم، کاهش اصطکاک درونی، کاهش مقاومت در برابر شکل‌پذیری و افزایش ازدیاد طول در آزمون کشش را نام برد. بررسی اثر ارتعاشات فراصوت بر مواد در حین انجام فرایندهای گوناگون می‌تواند به شناخت سازوکارهای تغییر شکل و عوامل مؤثر بر آن کمک کند. با استفاده از این قابلیت‌ها می‌توان کیفیت محصولات تولیدی را افزایش و عیوب مواد را کاهش داد. تحقیقات مربوط به ارتعاشات فراصوت از جنبه‌های مختلفی انجام می‌شوند. آثار مشاهده‌شده و عوامل ایجاد آنها از جمله مهم‌ترین مباحث‌اند که به‌واسطهٔ اعمال ارتعاشات فراصوت می‌توان آنها را از دو جنبهٔ ماکروسکوپی و میکروسکوپی بررسی نمود. در بعد ماکروسکوپی تنها اثر فراصوت بر نظریه‌های شکل‌دهی و خواص مواد اعمال می‌شود، اما در بررسی میکروسکوپی مدل‌های فیزیکی مواد، مشخصه‌ها و تحولات میکروساختاری مد نظر قرار می‌گیرند. آثار اعمال ارتعاشات فراصوت در اغلب فرایندهای شکل‌دهی به‌واسطهٔ شدت و نحوهٔ اعمال آن مشابه می‌باشد، اما عوامل تأثیرگذار بر این آثار، که توسط پژوهشگران بیان شده است، متفاوت می‌باشد؛ به‌گونه‌ای‌که هنوز جمع‌بندی دقیقی دربارهٔ عوامل اثرگذار به‌واسطهٔ اعمال ارتعاشات فراصوت ارائه نشده است.

چون ارتعاشات فراصوت سبب ایجاد پدیده‌هایی میکروساختاری می‌شود که به شکل پدیده‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی قابل مشاهده‌اند، در این مقاله به تشریح رفتار متالورژیکی و بررسی عوامل میکروسکوپی و درون‌ساختاری در ماده به‌واسطهٔ اعمال ارتعاشات فراصوت پرداخته خواهد شد. سپس نتایج حاصل از آزمایش‌های پژوهشگران جمع‌بندی و عوامل و آثار مشاهده‌شده به یکدیگر ارتباط داده خواهد شد و پس از بحث دربارهٔ آنها، در انتها هر یک از عوامل اثرگذار براساس تواتر و قوت دلائل طبقه‌بندی خواهند شد.

۲. مبانی نظری، تعریف‌ها و روش تحقیق

مهمترین مبحثی که دربارهٔ اثر فراصوت بر خواص تغییر شکل پلاستیک مواد توجه پژوهشگران را به‌خود جلب کرده است، سخت‌شدگی و نرم‌شدگی در اثر اعمال ارتعاشات فراصوت می‌باشد. نرم‌شدگی فراصوت اغلب حین اعمال ارتعاشات فراصوت و سخت‌شدگی پسماند اغلب پس از برداشتن ارتعاشات مشاهده می‌شود. برای اینکه بتوان به‌درستی این پدیده‌ها را توجیه کرد، باید شرایط انجام آزمون شامل خصوصیات و پیشینهٔ تغییر شکل قبلی ماده و پارامترهای شرایط محیطی (دما) و ارتعاشات فراصوت (فرکانس، توان و مود ارتعاش) را نیز مد نظر قرار داد.

نرم‌شدگی در اثر تغییر خواص پلاستیسیته را نرم‌شدگی حجمی و نرم‌شدگی در اثر اصطکاک را نرم‌شدگی سطحی می‌گویند. در نرم‌شدگی فراصوت، نابجایی‌های قفل‌شده در اثر تغییر شکل‌های معمولی توسط ارتعاشات فراصوت فعال شده، سبب کاهش تنش در تغییر شکل‌های پلاستیک بیشتر می‌گردد. در حالت سخت‌شدگی فراصوتی، در اثر اعمال انرژی فراصوت، ساختار کریستالی ماده دگرگون می‌شود و با افزایش و توسعهٔ این دگرگونی‌ها، استحکام تسلیم آن افزایش می‌یابد و سخت‌شدگی فراصوت رخ می‌دهد.

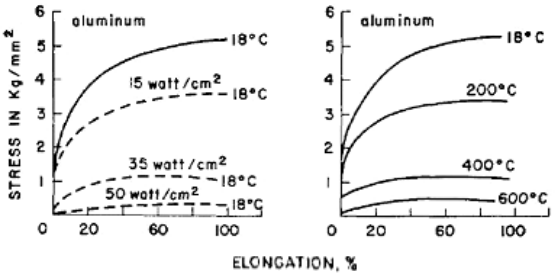
۳. پیشینهٔ پژوهش

تاکنون تحقیقات گسترده‌ای دربارهٔ تأثیر ارتعاشات فراصوت در آزمون کشش و فشار مواد انجام شده است. به‌دلیل موقت‌بودن ارتعاشات فراصوت بر روی ماده، پس از برداشتن تحریک فراصوت، معمولاً آثار به‌وجود آمده از بین می‌رود. لذا تحقیقات کمی روی تحلیل نمونه‌ها حین انجام تغییر شکل انجام شده است. همچنین به‌دلیل نبود تجهیزات، مشاهده و بررسی اثر ارتعاشات فراصوت در حین انجام آزمون با محدودیت مواجه بوده و تاکنون در این زمینه مطالعاتی انجام نشده است.

اولین تحقیقات را لانگنکر و بلاها (۱۹۵۵ م) روی فلز تک‌کریستال روی انجام دادند [۱]. آنها با اعمال ارتعاشاتی با فرکانس ۸۰۰ کیلوهرتز به نمونهٔ در حین آزمون کشش، کاهش قابل ملاحظه‌ای در حدود ۴۰ درصد در تنش مورد نیاز برای کشش مشاهده کردند. به کاهش تنش در نرخ کرنش ثابت و یا افزایش نرخ کرنش در تنش ثابت در اثر ارتعاشات فراصوت، اثر بلاها یا اکوستوپلاستیک[۲] نیز گفته می‌شود. آنها همچنین مشاهده کردند که کاهش تنش، در محدودهٔ ۱۵ تا ۸۰ کیلوهرتز مستقل از فرکانس ارتعاشات و تنها وابسته به دامنه می‌باشد.

پس از درگذشت بلاها، لانگنکر (۱۹۶۶ م) اثر ارتعاشات فراصوت بر خواص مکانیکی فلزاتی چون آلومینیوم و روی را بررسی نمود و به این نتیجه رسید که در اثر اعمال ارتعاشات، حد تسلیم فلزات به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد و این کاهش تنش تسلیم به‌طور مستقیم با انرژی فراصوت واردشده به نمونه متناسب است [۲]. همچنین نشان داد اگر قرار باشد این کاهش تنش تسلیم به‌وسیلهٔ انرژی حرارتی ایجاد شود، باید 10^{7} برابر انرژی مصرف گردد. دلیل این امر بدین صورت بیان شد که انرژی حرارتی به‌طور یکنواخت در سطح و حجم قطعه پخش می‌گردد، در صورتی که انرژی فراصوت در محل نابجایی‌ها، مرزدانه‌ها و تهی‌جای‌ها جذب شده و سبب تحرک بیشتر، افزایش موضعی دما و در نتیجه کاهش تنش تسلیم می‌گردد.

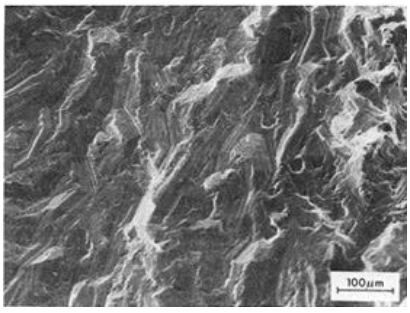
همان‌طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، اثر اعمال ارتعاشات فراصوت به مواد همانند افزایش دما سبب کاهش استحکام و تنش تسلیم می‌شود که این موضوع، نزدیکی و مشابهت ماهیت میکروسکوپی این دو پدیده را نشان می‌دهد.



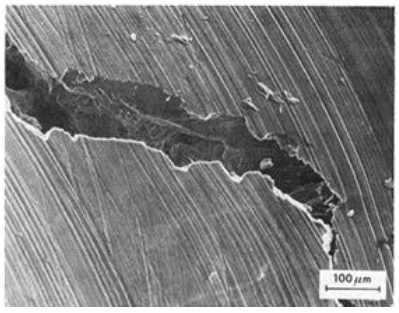
شکل ۱. مقایسهٔ اثر توان ارتعاشات فراصوت با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دما بر نمودار تنش - کرنش تک‌کریستال آلومینیوم [۱]

لانگنکر همچنین مشاهده کرد که با اعمال ارتعاشات فراصوت، بلافاصله تنش کاهش می‌یابد؛ حال آنکه افزایش دمای نمونه با تأخیر زمانی رخ می‌دهد. او همچنین بر این باور بود که این مشاهدات باید به‌دلیل تغییرات شدید در مدول یانگ فلز باشد [۲].

هانسن و تولن (۱۹۷۸ م) روی رفتار تغییر شکل آلومینیوم تجاری در حضور ارتعاشات فراصوت مطالعه و عنوان کردند که حرارت موضعی ایجادشده بر اثر جذب انرژی فراصوت در عیوبی چون جای خالی و نابجایی‌ها تأثیر زیادی در افزایش دمای قطعه ندارد و قابل اغماض است [۳]. دلیل این ادعا نیز ضریب انتقال حرارت بالای آلومینیوم و اتلاف حرارت سریع از این مواضع می‌باشد. از موارد مشاهده‌شده در اثر اعمال ارتعاشات فراصوت به نمونه می‌توان به ایجاد ترک در سطح نمونه، شکست ترد نمونه و ایجاد مناطق جزیره‌ای با چگالی نابجایی کم بین مناطق دارای چگالی نابجایی بالا کاملاً متفاوت اشاره کرد که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. نروبای (۱۹۸۷ م) اثر فراصوت را بر آلیاژهایی با شکل‌پذیری کم مثل فولادهای آلیاژی، سوپرآلیاژهای پایهٔ نیکل و چند آلیاژ تیتانیوم بررسی و بیان



(الف)



(ب)

شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی[۳] از نمونهٔ آلومینیومی در اثر اعمال ارتعاشات فراصوت
الف) مقطع شکست ترد، ب) ایجاد ترک در سطح نمونه [۳]

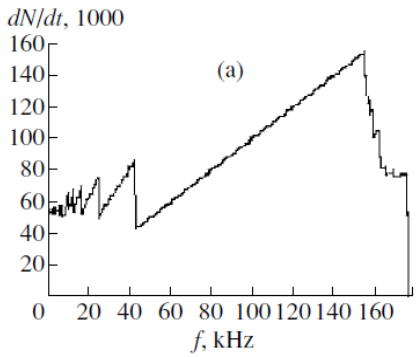
نمود که در اثر اعمال ارتعاشات فراصوت بر این فلزات، تنش تسلیم، استحکام نهایی و همچنین مقاومت به تغییر شکل کاهش می‌یابد [۴].

او بیان داشت که افزودن فراصوت به قطعه‌کار در حین کشش، به‌علت تشکیل عیب‌های اضافی در ساختار کریستالی فلز، سبب کاهش حد شکل‌دهی آن می‌شود. همچنین نمونهٔ مورد آزمون، مدت کوتاهی پس از شروع گلویی‌شدن[۴] دچار شکست می‌شود و ازدیاد طول نمونه نسبت به کشش معمولی با کاهش قابل توجهی در حدود ۲۰ درصد روبرو شد. این کاهش حد تغییر شکل پلاستیک، که در اثر اعمال ارتعاشات فراصوت حاصل می‌شود، معمولاً با تشکیل تجمع‌های نابجایی و جای خالی در مناطق موضعی و همچنین توسعهٔ ناپیوستگی‌های میکرو و تشکیل ترک‌ها و در نتیجه تجزیهٔ ساختار کریستالی و شکست همراه است [۴].

بلاژوچینسکی و پانین (۲۰۰۷ م) تغییر شکل پلاستیک در اثر ارتعاشات فراصوت را به‌کمک رایانه شبیه‌سازی و مشاهده کردند که میزان حلقه‌های نابجایی تولیدشده در واحد زمان بر اثر سازوکار فرانک - رید با افزایش فرکانس تغییر می‌کند [۵]. آنها به این نتیجه رسیدند که سرعت تولید حلقه‌های نابجایی تا فرکانس تشدید ۴۵ کیلوهرتز تغییر چندانی نداشته و از آن پس تا ۱۶۴ کیلوهرتز با افزایش فرکانس، نرخ نابجایی‌های تولیدشده افزایش می‌یابد و بعد از ۱۷۵ کیلوهرتز مطابق شکل ۳ تولید نابجایی‌ها متوقف می‌شود. هانگ و همکاران (۲۰۰۷ م) نیز آثار اصطکاکی ارتعاشات فراصوت را روی آلومینیوم ۶۰۶۱ در حین فشردن بررسی کردند [۶-۷]. در آزمایش‌ها از ارتعاشات با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دامنهٔ ۵ میکرومتر استفاده شده است. آنها بیان کردند که اعمال ارتعاشات فراصوت در حین فشردن آلومینیوم می‌تواند سبب افزایش اصطکاک بین سطوح و افزایش دما و در نتیجه کاهش نیروی مورد نیاز برای فشردن شود. این گروه با حذف آثار اصطکاک سطحی، فشردن آلومینیوم ۶۰۶۱ در حضور ارتعاشات فراصوت را نیز بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در غیاب آثار اصطکاکی، جذب انرژی توسط نابجایی‌ها مهمترین عامل کاهش نیروی شکل‌دهی می‌باشد. همچنین ریزشدن دانه‌ها و افزایش چگالی نابجایی‌ها و در نتیجه افزایش سختی سطحی نمونه‌ها در اثر اعمال ارتعاشات فراصوت از دیگر نتایج آنها بود.

میریانی و قاسمیه (۲۰۰۹ م) برای در نظر گرفتن آثار حجمی از مدل پلاستیسیتهٔ چرخه‌ای[۵] در ماده و همچنین برای در نظر گرفتن آثار سطحی ارتعاشات فراصوت در حین جوشکاری اصطکاکی از مدل اصطکاک سینماتیکی[۶] استفاده نمودند [۸]. در پژوهش آنها مشاهده شد که بیشینهٔ دمای جوشکاری با ارتعاشات فراصوت بسیار کمتر از دمای ذوب مواد مورد استفاده در جوشکاری می‌باشد. همچنین

قبل از رسیدن غلطک مرتعش‌کنندهٔ جوشکاری[۷] به فلز، با دریافت انرژی فراصوت، بخش تحت تأثیر نرم شده، کار جوشکاری راحت‌تر انجام می‌شود. ضمناً با افزایش نیروی غلطک مرتعش‌کننده، کرنش پلاستیک در سطح بین ورق و غلطک افزایش و در سطح بین ورق و لایهٔ زیرین کاهش یافته است که دلیل آن زمان و نرخ تغییر شکل بیان شده است. همچنین عامل اصلی تغییر شکل در سطح ورق و لایهٔ زیرین، آثار سطحی - که ناشی از اتلاف انرژی اصطکاکی می‌باشد - بیان شده است و سهم آثار حجمی در تغییر شکل ناچیز دانسته شده است.



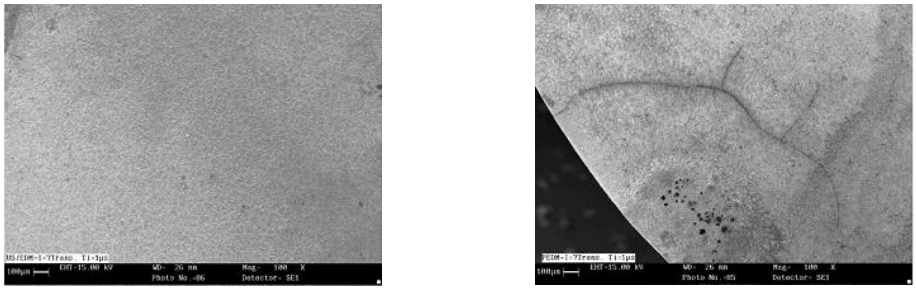
شکل ۳. نرخ تولید حلقه‌های فرانک - رید
به‌عنوان تابعی از فرکانس ارتعاشات اعمالی [۵]

ژو و همکاران (۲۰۰۹ م) با بررسی آثار جوشکاری اصطکاکی فراصوت بر ریزساختار فلز آلومینیوم ۶۰۶۱ به این نتیجه رسیدند که به‌علت کافی‌نبودن میزان تغییر شکل، اندازهٔ دانه‌ها بدون تغییر مانده، اما راستاهای کریستالی در ماده دچار تغییرات اساسی می‌شود و به ایجاد شبکهٔ مکعبی ضعیفی می‌انجامد [۹]. اگرچه در حین اعمال ارتعاشات فراصوت، تعداد زیادی ریزمرز و دانهٔ فرعی در ماده تشکیل می‌شود، اما به‌علت کم‌بودن انرژی و زمان فرایند، این اتفاق منجر به ایجاد مرزهایی با زاویهٔ بیشتر و در نتیجه دانه‌های ریزتر نمی‌گردد. مطابق شکل ۴ تصاویر تفرق الکترون برگشتی[۸] نشان داده است که فقط در سطح دو فلز جوشکاری‌شده به‌علت وجود ذرات ترد مثل اکسید آلومینیوم و خردشدن آنها، دانه‌های ریزتری تشکیل شده است. عبداله و همکاران (۲۰۰۹ م) تأثیر ارتعاشات فراصوت بر تنگستن - کارباید را در فرایند ماشینکاری تخلیهٔ الکتریکی[۹] بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با اعمال ارتعاشات فراصوت به ابزار، کیفیت سطح قطعات ماشینکاری‌شده به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد و موجب کاهش منطقهٔ تحت تاثیر حرارت و در نتیجه کاهش عمق، اندازه و تعداد ترک در نمونه می‌شود [۱۰]. نمونه‌های به‌دست آمده از ماشینکاری توأم با ارتعاشات فراصوت، صافی سطح بهتر و سختی سطح بیشتری پیدا می‌کنند. در شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح نمونهٔ تنگستن - کارباید در دو حالت ماشینکاری با و بدون اعمال ارتعاشات فراصوت نمایش داده شده است.

هوانگ و همکاران (۲۰۰۹ م) شکل‌پذیری مس و طلا تحت تأثیر ارتعاشات فراصوت را بررسی و مشاهده کردند که فلزاتی که به‌خوبی آنیل شده و چگالی نابجایی کمی دارند، پس از اعمال ارتعاشات فراصوت دچار سخت‌شدگی اکوستیکی می‌شوند، حال آنکه فلزات کار سرد شده با نرم‌شدگی اکوستیکی مواجه می‌شوند [۱۱-۱۲]. در اثر نرم‌شدگی پسماند، که پس از قطع ارتعاشات فراصوت در ماده باقی می‌ماند، شکل‌پذیری این دو فلز افزایش یافت که البته دلیل این نرم‌شدگی، جذب انرژی فراصوت در نابجایی‌ها و ناخالصی‌ها و فعال‌سازی نابجایی‌ها و در نهایت کاهش تنش لازم برای لغزش صفحات روی یکدیگر بیان شد. آنها بیان داشتند که میزان نرم‌شدگی اکوستیکی به برخی از خصوصیات ماده همچون دمای تبلور مجدد، انرژی بی‌نظمی آرایش[۱۰] و تنش برشی بحرانی[۱۱] وابسته است. هرچه میزان انرژی بی‌نظمی آرایش کمتر باشد، تحرک نابجایی‌ها کاهش خواهد یافت. همچنین با توجه به اینکه طلا دارای انرژی بی‌نظمی آرایش کمتر و تنش برشی بحرانی بیشتری نسبت به مس می‌باشد، نمونه‌های طلا با اعمال ارتعاشات فراصوت کمتر بازیابی می‌شوند و افزایش شکل‌پذیری مشاهده شده در آنها (۸ درصد) کمتر از نمونه‌های مسی (۱۳ درصد) می‌باشد [۱۱].

امواج فراصوت در مواضع ناهمگونی و ناپیوستگی حرارت موضعی ایجاد می‌کند و به‌همین دلیل در مواضعی که

شکل ٤. تصویر تفرق الکترون برگشتی از محل اتصال دو فویل [۹]



(ب) (الف)

شکل ۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونهٔ تنگستن – کارباید

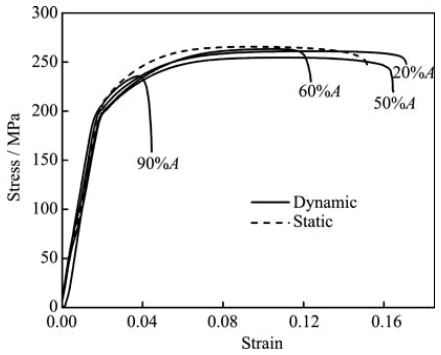
الف) ماشینکاری تخلیهٔ الکتریکی[۱۲] رایج، ب) ماشینکاری تخلیهٔ الکتریکی توأم با ارتعاشات فراصوت [۱۰]

به‌صورت عادی نابجایی‌ها قفل می‌شوند، به‌علت وجود حرارت موضعی، امکان حرکت و نفوذ نابجایی‌ها از کریستالی به کریستال دیگر و از دانه‌ای به دانهٔ دیگر ممکن می‌شود و با ادغام نابجایی‌های دوقطبی با یکدیگر، از میزان نابجایی‌ها کاسته می‌شود. همچنین مشاهده شد که در صورت اعمال موضعی ارتعاشات فراصوت در اتصال‌های غیرهمسان، به‌علت کاهش عیب‌های کریستالی و نابجایی‌ها تنش‌های پسماند حرارتی کاهش می‌یابند؛ در حالی‌که با تنش‌گیری حرارتی به‌علت ضریب انبساط حرارتی متفاوت فلزات مجاور، امکان ایجاد تنش‌های حرارتی در قطعه وجود دارد [۱۱].

تانگ و همکاران (۲۰۱۱ م) تغییر شکل پلاستیک آلیاژ منیزیم AZ31 را در آزمون کشش تحت تأثیر ارتعاشات فراصوت با فرکانس ۱۵ کیلوهرتز و توان ۲ کیلووات بررسی نمودند [۱۳]. آنها مشاهده کردند که در ارتعاشات کم‌دامنه، نرم‌شدگی حاصل شده و مقاومت به تغییر شکل نمونه کاهش و درصد ازدیاد طول آن افزایش می‌یابد. اما مطابق شکل ۶ در ارتعاشات با انرژی بالاتر (۶۰ درصد و ۹۰ درصد دامنهٔ حداکثر)، سخت‌شدگی سبب کاهش شکل‌پذیری و کرنش نمونه قبل از شکست می‌شود. دلیل این امر تردی و شکنندگی و کاهش تشکیل دوقلویی‌ها بیان شد. در موادی مثل منیزیم که شبکهٔ کریستالی آن HCP است، تغییر شکل پلاستیک غالب توسط دوقلویی‌شدن حاصل می‌شود؛ زیرا سیستم‌های لغزشی فعال در این مواد کم هستند. لذا چون ارتعاشات فراصوت سبب کاهش دوقلویی‌شدن می‌شود، تغییر شکل پلاستیک تقلیل یافته و تردی غالب می‌شود [۱۳].

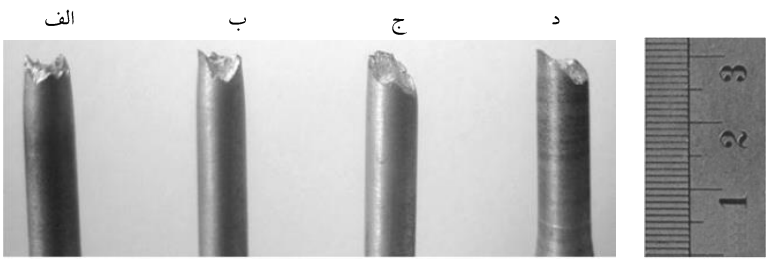
آنها همچنین معتقد بودند که با اعمال ارتعاشات فراصوت شدید به نمونه، به‌صورت ناگهانی چند صفحهٔ لغزش به‌وجود آمده و با حرکت و انتشار نابجایی‌ها در نمونه در زمان کم و با توجه به جهت تعویض‌شوندهٔ تنش، منجر به پیچ‌خوردگی و ایجاد مانع‌های نابجایی و تمرکز تنش در

نمونه و در نهایت شکست ناگهانی نمونه می‌شود. نمونه‌های (ج) و (د) در شکل ۷ نشان‌دهندهٔ شکست ۴۵ درجه و ترد است که این رفتار در اثر شدت ارتعاشات فراصوت و کاهش دوقلویی‌شدن می‌باشد؛ ضمن اینکه گلویی‌شدن در آنها مشاهده نمی‌شود. در حالی‌که نمونه‌های (الف) و (ب) شکست نرم مخروط و فنجان[۱۳] را همراه با گلویی‌شدن نشان می‌دهند.



شکل ٦. تأثیر شدت ارتعاشات فراصوت بر شکل‌پذیری و درصد ازدیاد طول آلیاژ منیزیم AZ31 [۱۳]

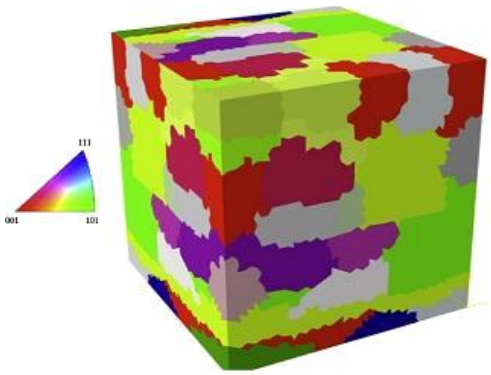
صدیق و سید (۲۰۱۲ م) برای شبیه‌سازی فرایند جوشکاری اصطکاکی فراصوت[۱۴] روشی بر پایهٔ میکروساختار ارائه نمودند و در آن یک مدل ساختاری ترمومکانیکی براساس میکرومکانیک و پلاستیسیته پیشنهاد کردند [۱۴]. آنها در این تحقیق با ویرایش تئوری پلاستیسیتهٔ کریستالی و در نظر گرفتن اثر نرم‌شدگی حرارتی و فراصوت، مدل ساختاری جدیدی ارائه کردند. در این مدل، پارامترهای مربوط به شرایط ماده و فراصوت به روش معکوس[۱۵] و با استفاده از مطالعات تجربی انجام‌شده در چگونگی تکامل ریزساختار در حین تغییر شکل به‌کمک فراصوت توسط میریانی و قاسمیه [۸] روی آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم به‌دست آمده است. سپس با شبیه‌سازی تغییر شکل آلیاژ چندکریستال[۱۶] آلومینیوم به‌کمک فراصوت و مقایسهٔ آن با کارهای تجربی در این زمینه به ارزیابی مدل خود پرداختند [۸–۹]. پس از شبیه‌سازی با دامنهٔ جابه‌جایی صفر، ۸/۴، ۱۲/۴ و ۱۴/۴ میکرومتر و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز به این نتیجه رسیدند که با افزایش شدت و دامنهٔ امواج فراصوت، لغزش پلاستیک جمع‌شده در قطعه (برای مدل دوبعدی با دانه‌های ستونی) و کرنش پلاستیک معادل (برای مدل سه‌بعدی) افزایش یافته و همچنین با افزایش نرم‌شدگی فراصوت، حجم تغییر شکل یافته از قطعه‌کار در اثر نیروی معین افزایش می‌یابد. شکل ۸ تصویر سه‌بعدی ریزساختار شبیه‌سازی‌شدهٔ آلومینیوم ۶۰۶۱ پلی‌کریستال و شکل ۹ تأثیر شدت فراصوت اعمالی را بر کرنش پلاستیک به‌وجود آمده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش شدت ارتعاشات فراصوت، میزان تغییر شکل و متعاقباً کرنش پلاستیک افزایش می‌یابد.



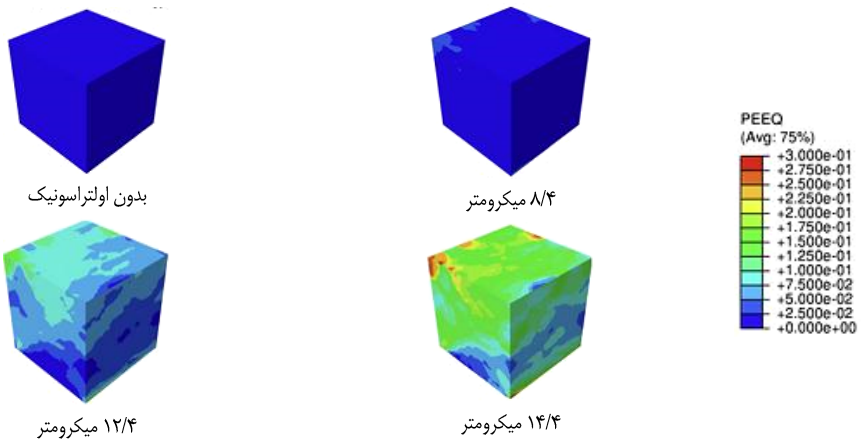
شکل ۷. مقطع شکست نمونه‌های منیزیم AZ31 [۱۳]
الف) کشش معمولی، ب) ۲۰ درصد (نرم)، ج) ٦۰ درصد، د) ۹۰ درصد (ترد)

مطابق شکل ۱۰ از دیگر موارد مشاهده‌شده در مواد در حین اعمال ارتعاشات فراصوت می‌توان به چرخش شبکهٔ کریستالی و تشکیل دانه‌های ریزتر در هر دانه که سبب تضعیف شبکه می‌شود اشاره کرد (شکل سمت راست). این پدیده نیز با

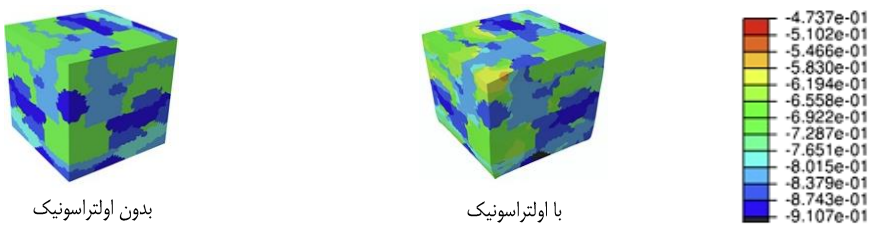
افزایش شدت و دامنهٔ ارتعاشات فراصوت افزایش می‌یابد. در نزدیکی ناحیهٔ تغییر شکل، به‌علت آثار سطحی و حجمی، همچنین سرعت متفاوت چرخش کریستال‌ها، فلز تبلور مجدد می‌یابد و دانه‌های جدید تشکیل می‌شوند [۱۴].



شکل ۸ تصویر سه‌بعدی ریزساختار چندکریستال شبیه‌سازی‌شدهٔ آلومینیوم ٦٠٦١ [١٤]



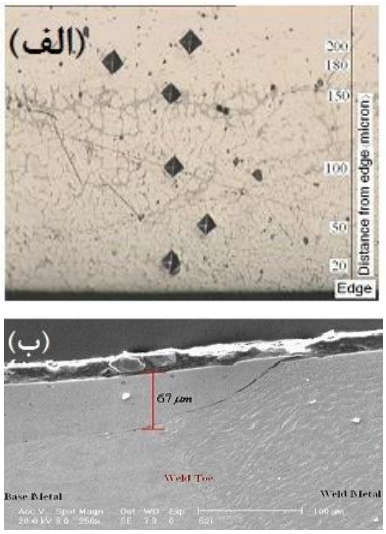
شکل ۹. تأثیر شدت فراصوت اعمالی بر کرنش پلاستیک به‌وجود آمده در پلی‌کریستال آلومینیوم ٦٠٦١ [١٤]



شکل ۱۰. اثر فراصوت بر جهت‌گیری شبکه [١٤]

عبداله و همکاران (۲۰۱۲ م) اثر چکش‌کاری فراصوت بر استحکام خستگی و میکروساختار اتصالات جوشی فولاد زنگ‌نزن را بررسی کردند [۵-۶]. پس از عملیات جوشکاری، به‌علت ایجاد تنش پسماند کششی در نمونه، ترک‌هایی در قسمت پایهٔ جوش به‌وجود می‌آید که این ترک‌ها سبب ایجاد تمرکز تنش و کاهش عمر خستگی

نمونه می‌شود. با اعمال ارتعاشات فراصوت، این ترک‌ها بسته شده، به‌علت تغییر شکل پلاستیک ایجادشده در سطح، شکل ظاهری جوش نیز اصلاح می‌شود. علاوه بر حذف تنش کششی پسماند سطحی، تنش پسماند فشاری نیز در سطح نمونه ایجاد می‌شود که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. همچنین مشاهده شد که اعمال ارتعاشات فراصوت در برخی از مواد با ایجاد تبلور مجدد در سطح نمونه موجب ایجاد لایهٔ سفید و بسیار مقاوم در برابر خوردگی و سایش می‌شود.



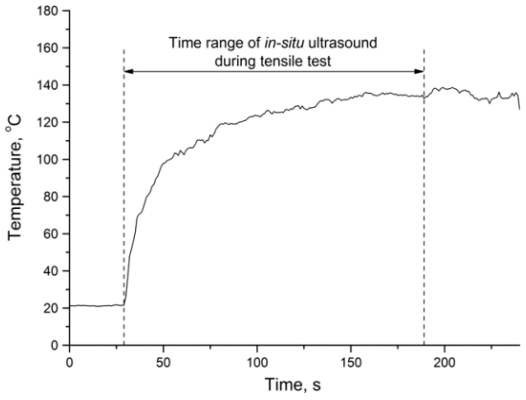
شکل ۱۱. نمایی از الف) لایهٔ مقاوم ایجادشده در نزدیکی سطح [۱۶]، ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از عمق لایهٔ تغییر شکل یافته در اثرچکش‌کاری فراصوت [۱۵]

شلوندی و همکاران (۲۰۱۳ م) آزادسازی تنش در نمونهٔ فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ را به‌وسیلهٔ ارتعاشات فراصوت و حرارت با یکدیگر مقایسه کرده‌اند [۱۷]. در این پژوهش، از ارتعاشات با فرکانس ۲۴/۵ کیلوهرتز و دامنهٔ ۲۳ تا ۴۶ میکرومتر استفاده شده است. پس از اعمال ارتعاشات فراصوت به نمونه مشاهده شد که تنش‌های پسماند در قطعه می‌توانند تا ۳۶ درصد کاهش یابند که قابل مقایسه با کاهش ۴۰ درصدی تنش پسماند به‌روش آزادسازی تنش توسط حرارت می‌باشد. همچنین مشاهده کردند که تنش سیلان متناسب با افزایش توان ارتعاشات فراصوت اعمالی کاهش می‌یابد و دلیل آن را کاهش استحکام لغزشی در ساختار ماده بیان کردند. ضمناً با وصل و قطع‌کردن ارتعاشات فراصوت در ناحیهٔ پلاستیک، تنش از مقدار اولیه فراتر می‌رود و سخت‌شدگی اکوستیکی رخ می‌دهد. شلوندی و همکاران با بررسی میکروساختار نمونه پس از آزادسازی تنش، تغییری در اندازهٔ دانه‌ها مشاهده نکردند و بیان داشتند که سازوکار اصلی کاهش تنش در اینجا احتمالاً گرم‌شدن موضعی در مرز دانه‌ها می‌باشد.

دوته و همکاران (۲۰۱۳ م) اثر ارتعاشات فراصوت طولی با فرکانس ۲۷ کیلوهرتز و دامنهٔ ۲۶ میکرومتر را در حین آزمون کشش روی ریز ساختار فولاد کم‌کربن DC04 بررسی کردند [۱۸]. ارتعاشات فراصوت در محدودهٔ کرنش ۸ تا ۲۰ درصد به نمونه اعمال شد و ریزساختار سطح مقطع نمونهٔ تغییر شکل یافته با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراش اشعهٔ ایکس[۱۷] و پراش الکترون برگشتی بررسی شد. با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که دمای نمونهٔ مورد آزمایش با اعمال ارتعاشات فراصوت افزایش می‌یابد که یکی از دلائل این امر، آسیب سطحی واردشده به نمونه در محل اعمال ارتعاشات بیان شد.

همچنین با توجه به شکل ۱۳ مشاهده شد که میزان تشکیل دانه‌های فرعی[۱۸] در نمونهٔ کشیده‌شده همراه با ارتعاشات فراصوت با کاهش روبرو می‌شود که این امر به‌علت اعمال همزمان ارتعاشات فراصوت و بارگذاری شبه‌استاتیک بوده است. ضمناً مشاهده شد که در حضور ارتعاشات فراصوت، چگالی نابجایی‌ها، مرزدانه‌های با زاویهٔ کوچک (ریزمرزها) و همچنین میزان چرخش[۱۹] و تغییر شکل دانه‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۳ مشخص است که در صورت اعمال فراصوت، جهت‌گیری دانه‌ها پس از تغییر شکل بیشتر در راستای انتشار امواج فراصوت خواهد بود. دوته و همکاران مشاهده کردند که با اعمال ارتعاشات فراصوت، نابجایی‌ها بیشتر در مجاورت مرزدانه‌ها تجمع می‌یابند. همچنین آنها

اثر فراصوت را به توانایی آن در افزایش میزان نابودی (ادغام) دوقطبی‌های نابجایی نسبت داده‌اند؛ زیرا ارتعاشات فراصوت نابجایی‌ها را مجبور به طی مسافت بیشتری می‌کند که این امر احتمال نابودی آنها را افزایش می‌دهد [۱۸].



شکل ۱۲. توزیع دمای گذرا در عمق یک میلی‌متری سطح حین اعمال ارتعاشات فراصوت [۱۸]

٤. بحث

در این بخش به بررسی هرچه دقیق‌تر هر یک از مشاهدات و دلائل ذکرشده در مورد اثر ارتعاشات فراصوت پرداخته خواهد شد. با اعمال ارتعاشات فراصوت به مادهٔ در حین بارگذاری، تنش تسلیم و استحکام ماده بلافاصله کاهش می‌یابد که به این پدیده نرم‌شدگی اکوستیکی گفته می‌شود. این رفتار ماده تنها تا زمانی پابرجاست که ارتعاشات فراصوت به آن متصل باشد. همیشه پس از قطع ارتعاشات فراصوت شرایط به حال اولیه بازنمی‌گردد و با توجه به دامنه و انرژی ارتعاشات اعمالی، جنس ماده و دمای آزمایش می‌تواند سخت‌شدگی پسماند و یا نرم‌شدگی پسماند در ماده باقی بماند. در مواقعی که سخت‌شدگی پسماند رخ می‌دهد، اگر نمونهٔ مذکور تحت کشش تک‌محوری توأم با ارتعاشات فراصوت قرار گیرد، ازدیاد طولی کمتر از ازدیاد طول اولیه در شرایط بدون اعمال ارتعاشات مشاهده خواهد شد. اما اگر پس از قطع و وصل‌کردن ارتعاشات فراصوت، نرم‌شدگی پسماند در ماده رخ دهد، با آزمون کشش توأم با ارتعاشات فراصوت، ازدیاد طول بیشتری نسبت به کشش بدون ارتعاشات فراصوت در نمونه به‌وجود خواهد آمد. گفتنی است که بنابر مشاهدات محققان، تغییر فرکانس ارتعاشات فراصوت تأثیر چندانی بر رفتار مشاهده‌شده نمی‌گذارد. واضح است که آثار مکانیکی ناشی از کاربرد ارتعاشات فراصوت، به‌دلیل آثار متالورژیکی و ساختاری ماده است و دلیل اصلی وقوع اتفاقات مشاهده‌شده را باید در فعل و انفعالات ریزساختاری مواد جستجو کرد. به‌طور خلاصه از مهمترین آثار ارتعاشات فراصوت بر رفتار متالورژیکی ماده می‌توان به افزایش سرعت رشد دانه‌ها، کاهش میزان نابجایی‌ها، کاهش چرخش شبکه‌های کریستالی، کاهش تشکیل ریزمرزها و ریزدانه‌ها و افزایش میزان بازیابی و تبلور مجدد ماده اشاره کرد. مطابق آنچه اکثر محققان مثل لانگنکر، هوانگ، هنسن، صدیق، شلوندی، دوته و جز این‌ها بیان کردند، یکی از آثار اعمال ارتعاشات فراصوت به فلز، گرم‌شدن موضعی آن در اطراف نابجایی‌ها می‌باشد. این گرم‌شدن موضعی سبب تضعیف فلز در آن نقاط می‌شود و حرکت نابجایی‌ها را تسهیل می‌نماید. در نتیجه تنش لازم برای حرکت نابجایی‌ها که طبق نظریهٔ نابجایی‌ها برابر تنش برشی لازم برای تغییر شکل ماده است، کاهش می‌یابد. این کاهش تنش به‌صورت نرم‌شدگی اکوستیکی ظاهر می‌شود و با افزایش شدت ارتعاشات فراصوت، این نرم‌شدگی بیشتر خواهد شد. نظریهٔ دیگری که برخی از پژوهشگران در مورد علت نرم‌شدگی مواد در اثر اعمال ارتعاشات فراصوت بیان کرده‌اند، برهم‌نهی تنش‌ها می‌باشد. محققانی مثل تاکائو، وینسپر، داوسون، یائو و جز این‌ها بر این عقیده بودند که جمع تنش‌های استاتیک و نوسانی می‌تواند اتفاقات مشاهده‌شده و نرم‌شدگی و کاهش استحکام مواد را توجیه کند، اگرچه به‌نظر می‌رسد فقط در توان‌های کم ارتعاشات فراصوت این نظریه قابل توجیه است. همچنین محققانی مثل داوود نشان دادند که با توجه به میزان تنش نوسانی اعمالی، آثار ناشی از برهم‌نهی در مقابل کاهش تنش مشاهده‌شده ناچیز است و نمی‌تواند دلیل اصلی وقوع

مشاهدات باشد. با نگاهی جامع به مطالعات انجام‌شده در زمینهٔ اثر ارتعاشات فراصوت بر فلزات می‌توان دریافت که ارتعاشات فراصوت سبب کاهش اندازهٔ دانه و کاهش استحکام و تنش تسلیم می‌شود. اما چیزی که در آن میان نتایج محققان اختلاف وجود دارد، اثر آن بر درصد ازدیاد طول نمونه‌های کششی یا مقاومت به تغییر شکل در فرایندهای شکل‌دهی است. این اختلاف به‌علت تفاوت شدت ارتعاشات فراصوت مورد استفاده می‌باشد. به‌طور کلی در صورت استفاده از ارتعاشات با توان کم، درصد ازدیاد طول نمونه افزایش و شکل‌پذیری بهبود می‌یابد. اما با افزایش توان مورد استفاده، درصد ازدیاد طول نمونه‌های کششی کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای‌که گاهی اوقات، شکست ترد نمونه بدون وقوع پدیدهٔ گلویی‌شدن، همراه با درصد ازدیاد طولی چندین برابر کمتر از حالت معمولی مشاهده می‌شود [۱۳].

به‌عبارت دیگر، با توجه به میزان شدت ارتعاشات فراصوت، با وصل و قطع‌کردن ارتعاشات در حین کشش نمونه ممکن است سخت‌شدگی یا نرم‌شدگی اکوستیک رخ دهد. اگر شدت ارتعاشات کم باشد، با وصل و قطع‌کردن ارتعاشات در ناحیهٔ پلاستیک، منحنی تنش-کرنش ادامهٔ مسیر را نخواهد پیمود و پایین‌تر از منحنی قبلی ادامه می‌یابد. اما اگر شدت ارتعاشات زیاد باشد، پس از قطع‌کردن ارتعاشات، تنش از مقدار اولیه فراتر می‌رود و منحنی به‌سمت بالا انتقال پیدا می‌کند که در این‌صورت سخت‌شدگی اکوستیک رخ داده است. اگر با وصل و قطع‌کردن ارتعاشات، نرم‌شدگی اکوستیکی در ماده رخ دهد، بدین معناست که اگر ارتعاشات فراصوت تا شکست نمونه به آن متصل باشد، در این‌صورت احتمالاً نمونه ازدیاد طول بیشتری نسبت به حالت معمولی تجربه خواهد کرد. به‌طور مشابه، در صورت وقوع سخت‌شدگی اکوستیکی در ناحیهٔ پلاستیک، ماده ازدیاد طول کمتری نسبت به حالت بدون اعمال ارتعاشات فراصوت خواهد داشت. سخت‌شدگی اکوستیکی یا سختی پسماند مشاهده‌شده در برخی از تحقیقات می‌تواند به‌علت افزایش چگالی نابجایی‌ها و تشکیل حلقه‌های نابجایی و جای خالی قفل‌شده باشد. در حالی‌که حرارت موضعی به‌وجود آمده توسط انرژی اکوستیک می‌تواند باعث ادغام نابجایی‌ها و نوعی آنیل‌شدن گردد. فرایند آنیل سبب کاهش چگالی نابجایی‌ها و در نهایت منجر به نرم‌شدگی اکوستیکی می‌شود. تعادل بین میزان آنیل‌شدن و تولید و حرکت نابجایی‌ها، وقوع سخت‌شدگی یا نرم‌شدگی اکوستیکی را مشخص می‌کند [۱۱].

۵. نتیجه‌گیری

به‌طور کلی مهمترین مشاهدات و دلائل بیان‌شده در رابطه با اثر اعمال ارتعاشات فراصوت به مواد را می‌توان به شکل زیر خلاصه نمود. این مشاهدات و دلائل براساس دفعات تکرار و قوت دلائل، به‌ترتیب بیان شده‌اند. مشاهدات متأثر از ارتعاشات فراصوت در تغییر خواص مواد را می‌توان به شرح زیر تقسیم‌بندی نمود:

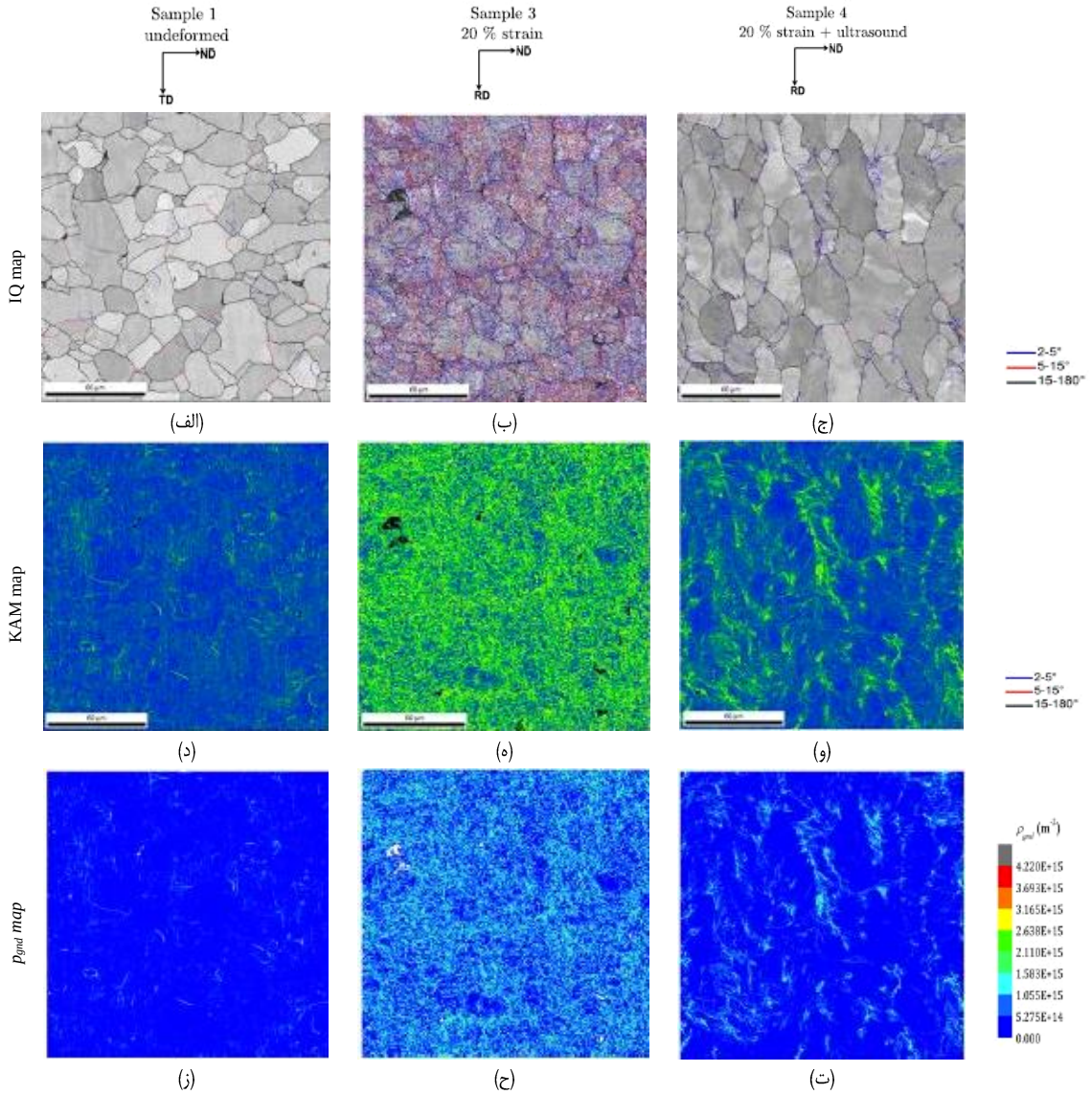
۱. کاهش استحکام تسلیم حین اعمال ارتعاشات فراصوت
۲. افزایش (سخت‌شدگی پسماند) یا کاهش (نرم‌شدگی پسماند) استحکام تسلیم پس از برداشتن ارتعاشات فراصوت از روی نمونه
۳. شکست ترد (توان‌های بالا) و نرم (توان‌های پایین) نمونه در آزمون کشش و تغییر شکل پلاستیک
۴. افزایش دمای ماده در توان‌های بالای فراصوت
۵. ریزشدن دانه‌ها
۶. کاهش اصطکاک بین سطوح در حین تغییر شکل پلاستیک

عوامل فیزیکی و میکروساختاری اثرگذار فراصوت در تغییر خواص مواد را می‌توان به شرح زیر تقسیم‌بندی نمود:

۱. ایجاد حرارت موضعی به‌واسطهٔ جذب انرژی فراصوت در عیب‌هایی مثل جای‌خالی و نابجایی‌ها
۲. تسهیل حرکت نابجایی‌ها به‌واسطهٔ انرژی فراصوت (جذب انرژی فراصوت در نواحی مشخص مانند نابجایی‌ها، حفره‌ها، جای خالی‌ها و مرزدانه‌ها)

۳. کاهش چگالی نابجایی‌ها، مرزدانه‌های با زاویهٔ کوچک (ریزمرزها) و همچنین چرخش و تغییر شکل دانه‌ها
۴. برهم‌نهی تنش‌های استاتیک و دینامیک (فراصوت)
۵. افزایش عرض مرزدانه‌ها به‌واسطهٔ ادغام نابجایی‌ها و ناخالصی‌ها در آنها

بی‌شک بررسی ساختار میکروسکوپی، مرز شبکه‌ها و مرزدانه‌ها بهترین راه برای مشاهدهٔ این آثار است و به‌عنوان زمینه‌ای برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود؛ زیرا در مطالعات انجام‌شده تاکنون کمتر به آن پرداخته شده است. برای مثال به‌طور قطع مشخص نشده است که اثر ارتعاشات بر پلاستیسیته، ناشی از اثر خارجی[۲۰] (مثل تغییر دما یا تنش) یا داخلی[۲۱] (مثل حرکت نابجایی‌ها) است. البته برای بررسی دقیق این موارد نیاز به استفاده از میکروسکوپ‌هایی قوی همچون میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ الکترونی عبوری[۲۲] حین اعمال ارتعاشات فراصوت می‌باشد که امری پیچیده خواهد بود.



شکل ۱۳. مقایسهٔ میزان تشکیل دانه‌های فرعی، چرخش دانه‌ها و چگالی نابجایی‌ها در سه نمونه از فولاد DC04 قبل و بعد از آزمون کشش تحت ارتعاشات فراصوت [۱۸]

۶. مآخذ

[1] Blaha, F., B. Langenecker. "Tensile deformation of zinc crystal under ultrasonic vibration." *Naturwissenschaften*, 42, 1955. p. 556.

[2] Langenecker, B. "Effects of ultrasounds on deformation characteristics of metals." *IEEE Trans. Son.Ultrason*, SU-13, 1966, pp. 1-8.

[3] Hansson. I., A. Tholen. "Plasticity due to superimposed macrosonic and static strains." *Ultrasonics* 16, 1978, pp. 57-64.

[4] Nerubai, M. S. "Effect Of Ultrasonic Vibrations On The Mechanical Properties Of Difficult-To Deform Materials." Kuibyshev Polytechnic Institute, Translated from Metallovedenie I TermicheskayaObrabotka, Metallov 4, 1987, pp. 10-13.

[5] Blagoveshchenskii, V. V., I. G. Panin. "An increase in the rate of plastic deformation under the effect of ultrasound." *The Physics of Metals and Metallography*, Vol. 103, No. 4, 2007, pp. 424-426,

[6] Hung, Jung-Chung, Yu-Chung Tsai, Chinghua Hung. "Frictional effect of ultrasonic-vibration on upsetting." *Ultrasonics* 46, 2007, pp. 277-284.

[7] Hung, Jung-Chung, Chih-Chia Lin. "Investigations on the material property changes of ultrasonic-vibration assisted aluminum alloy upsetting." *Materials and Design* 45, 2013, pp. 412-420.

[8] Mariani, E., E. Ghassemieh. "Microstructure evolution of 6061 O Al alloy during ultrasonic consolidation: An insight from electron backscatter diffraction." *Acta Materialia* 58, 2010, pp. 2492-2503.

[9] Zhu, Z., B.P. Wynne, E. Ghassemieh, A. Siddiq. "Microstructural Analysis of Ultrasonic Welded AA6061 by Electron Backscattered Diffraction." *Rare Metal Materials and Engineering* 38, 2009, pp. 147-151.

[10] Abdullah. A., Mohammad R. Shabgard, A. Ivanov, Mohammad T. Shervanyi-Tabar. "Effect of ultrasonic-assisted EDM on the surface integrity of cemented tungsten carbide (WC-Co)." *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 41, 2009, pp. 268-280.

[11] Huang, H., A. Pequegnat, B. H. Chang, M. Mayer, D. Du, Y. Zhou. "Influence of superimposed ultrasound on deformability of Cu." *Journal of applied physics* 106, 2009.

[12] Huang, H., A. Pequegnat, B. H. Chang, M. Mayer, D. Du, Y. Zhou. "Influence of superimposed ultrasound on deformability of gold." *Journal of applied physics* 105, 2009.

[13] Tong, Wen, Li Wei, Xia Chen, Chun-lei Pei. "Effects of ultrasonic vibration on plastic deformation of AZ31 during the tensile process." *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Volume 18, 2011. Pp. 70-76.

[14] Siddiq, A., Sayed, Tamer El. "A thermomechanical crystal plasticity constitutive model for ultrasonic consolidation." *Computational Materials Science*, Vol. 51, 2012, pp. 241-251.

[15] Abdullah, A., Massoud Malaki, Ahmad Eskandari. "Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening." *Materials and Design* 38, 2012, pp. 7-18.

[۱۶] عابدینی، رضوان، امیر عبداله. "طراحی و ساخت ابزار اولتراسونیک پینینگ"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک (ساخت و تولید)، دانشکدهٔ مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، ۱۳۸۸.

[17] Shalvandi, M., Y. Hojjat, A. Abdullah, H. Asadi. "Influence of ultrasonic stress relief on stainless steel 316 specimens: A comparison with thermal stress relief." *Materials and Design* 46, 2013, pp. 713-723.

[18] Dutta, R. K., R. H. Petrov, R. Delhez, M. J. M. Hermans, I. M. Richardson, A. J. Böttger. "The effect of tensile deformation by in situ ultrasonic treatment on the microstructure of low-carbon steel." *Acta Materialia* 61, 2013, pp. 1592-1602.

پی‌نوشت

1. ultrasonic
2. acoustoplastic
3. scanning electron microscope (SEM)
4. necking
5. cyclic plasticity theory
6. kinematic friction model
7. sonotrode
8. electron back scattered diffraction (EBSD)
9. electro discharge machining (EDM)
10. stacking fault energy (SFE)
11. critical resolved shear stress (CRSS)
12. electrical discharge machining (EDM)
13. cup-cone
14. ultrasonic consolidation
15. inverse method
16. poly crystal
17. X-ray diffraction (XRD)
18. subgrain
19. misorientation
20. extrinsic
21. intrinsic
22. transmission electron microscopy (TEM)