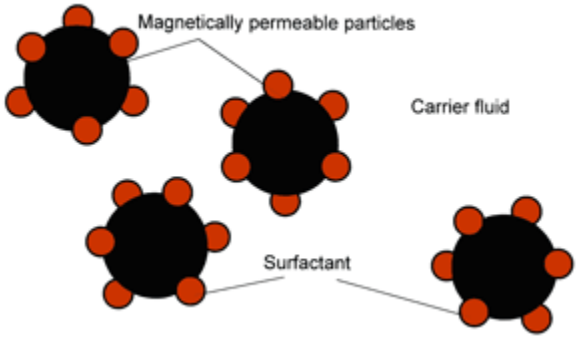
فِروسَیّال چیست؟

ferrofluid یا فروسیال مایعی است با ذرات بسیار ریز مغناطیسی (عمدتاً آهنی) به‌صورت کلوئیدیِ پایدار و چسبیده به مولکول‌های مایعِ حامل. در آزمایشهای مربوط به تفنگ ریلی و دیامغناطیسم، مولکولهای هوا که دوقطبیهای مغناطیسی ریزی هستند به دلیل جذب شدن به نواحی دارای میدان مغناطیسی شدیدتر و در نتیجه ازدیاد فشار هوا در آن نواحی نسبت به نواحی مجاور نقش بارزی ایفا می‌نمایند. به عبارتی این آزمایشها اهمیت وجود سیالی حاوی دوقطبی‌های ریز و جوش خورده با دیگر مولکولهای سیال را نشان می‌دهد. همین ایده انگیزه‌ی ساخت مصنوعی چنین سیالی است که در آن به جای مولکولهای هوا از ذرات بسیار ریز آهنی که از لحاظ مغناطیسی بسیار قویتر از مولکولی از هوا هستند استفاده می‌شود. چنین سیالی همان فِروسَیّال (یا ferrofluid) می‌باشد.

یک آهنربای مایع یا فروسیال، مخلوطی کلوئیدی از ذرات مغناطیسی (به قطرِ تقریباً 10 نانومتر) در یک مایع حامل می‌باشد. همچنین، حامل دارای ماده‌ی ترسازی است که از چسبیدن ذرات به یکدیگر ممانعت به عمل می‌آورد، و مایع حامل، آب یا یک سیال آلی است. نوعاً فروسیال از نظر حجمی متشکل است از حدوداً 5% جامدهای مغناطیسی، 10% ترساز، و 85% حامل. در یک نوع فروسیالِ قابل ساخت، برای ذرات مغناطیسی از آهن مغناطیسی (Fe_3O_4)، برای ترساز از اسید اولئیک، و برای سیالِ حامل از نفت سفید استفاده می‌شود. ترساز باید قابل حل در مایع حامل باشد.

غالباً در فرایند ساخت فروسیال‌ها پوشش‌هایی از مواد مختلف بر روی ذرات مغناطیسی داده می‌شود که دو وظیفه‌ی مهم به‌عهده دارند: اولاً نقش ترساز را بازی می‌کنند یعنی با ایجاد جاذبه‌های مولکولی قوی بین خود و مولکول‌های مایع حامل، سیالی یکدست ایجاد کرده و مانع تودشدگیِ ذرات مغناطیسی حتی تحت شیب‌های شدید میدان مغناطیسی می‌شوند و ثانیاً به‌دلیل جرم حجمیِ کمتر آنها نسبت به ذرات مغناطیسی، باعث می‌شوند که جرم حجمی متوسط ذرات دارای پوشش از جرم حجمی ذرات مغناطیسی بدونِ پوشش کمتر شده و در حد تعلیق در مایع حامل باشد تا به این ترتیب کلوئیدی پایدار تشکیل شود.



معرفی کامل فِروسَیّال و بررسی خواص فیزیکی-شیمیایی و کاربردهای انواع آنها

فِروسَیّال‌ها (که همچنین سیال‌های مغناطیسی یا نانوسیال‌های مغناطیسی نیز نامیده می‌شوند) دسته‌ی ویژه‌ای از مواد نانو می‌باشند که به‌طور همزمان خواص مایع و سوپرپارامغناطیسم را نشان می‌دهند. امکان کنترل مغناطیسی روی خواص و جریان آنها، تحقیقاتِ جهت‌گیری شده‌ی اساسی و عملی را تسریع نمود. در اینجا نتایجِ به‌دست آمده روی سنتز، خواص، و فروهیدرودینامیک فروسیال‌ها در کنار کاربردهای مهندسی و پزشکی-زیستیِ آنها خلاصه خواهد شد.

مقدمه

فروسیال‌ها (یا مایع‌های مغناطیسی)، به‌ویژه نانوسیال‌های قابلِ کنترلِ مغناطیسی، دسته‌ی ویژه‌ای از مواد نانوی هوشمندند [1]. این نوع از نانوسیال‌ها، کلوئیدهای مواد نانویی مثل Fe، Co، $CoFe_2O_4$، γ-Fe_2O_3، Fe_3O_4 یا Fe-C می‌باشند که به‌طور پایدار در یک مایع حامل پراکنده شده‌اند [2]، درنتیجه، این مواد نانو به‌طور همزمان خواص سیّال و مغناطیسم را نشان می‌دهند. ازنظرِ بزرگ-مقیاس، معرفی نیروهای مغناطیسی در معادلات اساسی هیدرودینامیک برای مِدیوم‌های

شِبهِ‌همگنِ مایعِ قابلِ مغناطیس شدن، موجدِ علمِ هیدرودینامیکِ مغناطیسیِ نانوسیال‌ها (یا فروسیال‌ها)ی مغناطیسی می‌باشد که همچنین به‌عنوان فروهیدرودینامیک شناخته می‌شود و افق وسیعی از پدیده‌های جدید [3] و کاربردهای امیدبخش [4] را به‌روی ما می‌گشاید.
ازنظر کوچک-مقیاس، نیروهای دوربرد جاذبه‌ای وان‌دروالسی و مغناطیسی، همه‌جا حاضرند و بنابراین باید در توازن با نیروهای کولنی، فضایی، و دیگر فعل و انفعالات قرار گیرند تا پایداریِ کلوئیدیِ سیستم نانوذراتِ پراکنده شده را حتی در میدان‌های مغناطیسیِ قوی و به‌شدت غیرِیکنواخت، که ویژه‌ی غالبِ کاربردها هستند، کنترل نمایند [5] [6].
در بسیاری از کاربردهایی که با آنها مواجهیم، مثلاً در درزبندی‌ها یا بارپذیری‌های چرخشی، نیاز به سیال‌هایی مغناطیسی با مغناطشِ قوی و درعین‌حال با پایداری کلوئیدیِ طولانی‌مدت می‌باشد. فراهم‌آوریِ همزمانِ این الزمات، مشکل است و شرایط سختی را در مورد پروسه‌های پایدارسازی که در خلال سنتز نانوسیال‌های مغناطیسی به‌کار می‌رود ایجاب می‌کند.
درحالِ‌حاضر، ترکیب، ساختمان و خواص انواع مختلف فروسیال‌ها، و همچنین کاربرهای صنعتی و پزشکی-زیستی آنها مشخص و ارائه شده است [2و 5].

سنتز فروسیال‌ها

سنتز فروسیال‌ها دو مرحله‌ی اصلی دارد: (a) آماده‌سازی ذرات مغناطیسیِ نانوابعاد (درحدود 2 تا 15 نانومتر)، و (b) متعاقباً پراکنده‌سازی/پایدارسازیِ نانوذرات در مایعات حامل قطبی و غیرقطبی مختلف. در آنچه به نانوذرات هیدروکسید آهن مربوط می‌شود مؤثرترین روش، پروسه‌ی ته‌نشینی همزمان شیمیایی است [2]. برحسب خواص مایع حامل و کاربردهای مورد انتظار، رویّه‌های مختلفی از سنتز فروسیال توسعه یافته است [5]. عجالتاً، مکانیسم‌های پایدارسازی نانوذرات مغناطیسی در انواع مختلف مایعات حامل، به‌گونه‌ای که مانعِ تشکیلِ غیرقابلِ‌برگشتِ توده‌ذرات، حتی در میدان‌های مغناطیسیِ شدید و قویاً غیرِیکنواخت شوند، مشخص شده است.

مشخصات

<u>تحقیقات ساختمانی و پایداری کلوئیدی.</u> در موردِ نانوذراتی که از لحاظ فضایی در مایع‌های حامل مختلف پایدار شده‌اند کاراییِ پوشش سطحیِ ذرات را نوع و کیفیتِ ترسازهای مورد استفاده، همچنین دمای مدیوم، و درنتیجه تعادل بین فعل و انفعالات جاذبه‌ای و دافعه‌ایِ بین ذرات، تعیین خواهد کرد. وقتی فعل و انفعالات جاذبه‌ای غالب باشد ممکن است انواع توده‌شدگی‌ها، که معمولاً به‌شکلِ زنجیره‌های خطیِ شِبهِ موازی با خطوط میدان مغناطیسیِ اِعمال شده یا به‌شکلِ تراکم‌های شِبهِ قطره‌ای هستند، حاصل شود [7].
توده‌شدگی‌ها در سیال‌های مغناطیسی مورد استفاده در اغلب کاربردها، نامطلوبند، بنابراین روش‌های شناسایی، عمدتاً روی این پروسه‌های توده‌شدگی و پی‌آیندهای آنها در رفتار ماکروسکوپیک سیال‌ها متمرکز شده‌اند.
یکی از مؤثرترین روش‌های تحقیقات نانوساختمانی، براساسِ پراکندگی نوترونی تحتِ زاویه‌ی کوچک (SANS یا small angle neutron scattering) می‌باشد [8].
از این روش برای آشکار کردن خصیصه‌های ساختمانی در ابعاد 1 تا 100 نانومتر استفاده می‌شود و به‌طور مفصل در کنار نتایجِ DLS ،TEM، و آنالیزهای مگنتوگرانیولومتری ارائه شده است.
<u>خواص مغناطیسی.</u> از منحنی‌های مغناطش می‌توان به‌طورِ گسترده برای مطالعه‌ی فعل و انفعالات ذره‌ای و نیز شکل‌گیریِ توده‌شدگی‌ها، که پروسه‌هایی هستند که قویاً رفتار سیال‌های مغناطیسی را از جنبه‌ی جریان و تغییر شکل ماده و هیدرولوژی مغناطیسی تحت تأثیر قرار می‌دهند، استفاده کرد. مغناطِشِ اشباع (M_s)، فروگیریِ اولیه (χ_i)، منحنی‌های مغناطش کامل ($M=M(H)$ یا $M/M_s(H$) که در آن H شدت میدان مغناطیسیِ اِعمال شده است) و آنالیز مگنتوگرانیولومتری (قطر مغناطیسی متوسط $<D_m>$ و انحراف معیارِ استاندارد σ) در مقادیرِ مختلفِ تغلیظِ حجمیِ نانوذرات مغناطیسی، دیدی مقایسه‌ای روی مشخصات میکروساختمانی نمونه‌های مختلف به ما می‌دهد [9 و 10].
اندازه‌ی خوشه‌ها می‌تواند اشاره‌ای اولیه باشد به درجه‌ی پراکندگی ذرات و نیز به قدرت فعل و انفعالات بینِ ذره‌ای. این اندازه را، معمولاً می‌توان به روش‌های اپتیکی (مثلاً به روشِ DLS) آنالیز نمود. علیرغم پروسه‌ی خوشه‌ای شدن، فعل و انفعالات بینِ ذره‌ای جاذبه‌ای خالص (که به‌عنوانِ نوعِ دوقطبی-دوقطبی درنظر گرفته می‌شود)، براثرِ دافعه‌ی فضایی القا شده توسطِ لایه‌های پوششیِ دوگانه، باید کاملاً ضعیف باشد. چنین تصور می‌شود که فعل و انفعالات جاذبه‌ای، تنها آشفتگی‌های انرژیِ عدمِ همگنیِ اصلیِ ذرات را القا می‌نمایند. اسپکتروسکوپی وابسته به دمای *Mossbauer* [11] درحال فراهم‌آوریِ اطلاعات روی ترکیبِ فازیِ ذره، ساختمان و تقارن موضعی، فعل و انفعالات مغناطیسیِ موضعی درون ذره و پدیده‌های استراحت (یا relaxation) از نوع *Neel* می‌باشد.

خواص ناشی از جریان و تغییر شکل ماده و خواص هیدرولوژی مغناطیسی [12]. فروسیال‌ها به‌ویژه به ترکیب، کسر حجمی ذره، و درجه‌ی پایداریِ کلوئیدیِ فروسیال‌ها، و نیز به شدت میدان مغناطیسیِ اِعمال شده بستگی دارند. تاکنون، روش‌شناسیِ تحقیقات روی خواص جریان و نتایج اصلی، با تأکیدی کامل بر فروسیال‌هایی که به‌ویژه در کاربردها مناسبند، ارائه شده است.

فروهیدرودینامیک

معادلات فروهیدرودینامیک، که ابتدائاً توسط Neuringer و Rosenweig [3] توسعه یافت، با مواردِ کاربردی تطبیق داده شده است. نخست معادلات استنتاج شده برای یک فروسیال شِبهِ‌همگن در تقریبِ شِبهِ استاتیک ارائه گردید، که مربوط به یک فروسیالِ رقیق‌شده، با دوقطبی‌های مغناطیسیِ شِبهِ نقطه‌ای و رفتار لانژوینیِ مغناطش در یک میدان کُند-تغییر، می‌باشد. سپس، مدلِ فروسیال‌ها با چرخش‌های داخلی (Rosensweig [14]، Shlomis [13]) با احتسابِ استراحت مغناطش توسط مکانیسم نوعِ Neel یا Brown، طرح‌ریزی گردید.

کاربردهای صنعتی و زیستی-پزشکی [1 تا 6، و 15 تا 18]

این کاربردها شامل موارد زیر است:

سنتز انواع جدیدی از مواد نانوساختمان ناهمگن مثل نانوکامپوزیت‌های پلیمری و امولسیون‌ها و ژل‌های قابلِ کنترلِ مغناطیسی؛ درزبندی دینامیک با سیال‌های مغناطیسی؛ تحمل بار توسط سیال مغناطیسی؛ بلندگوهای کویل-متحرک با دمپرها و خنک‌سازهایی از جنس سیال مغناطیسی؛ دمپرهای اینرسی با استفاده از سیال‌های مغناطیسی؛ سنسورها و فعال‌سازها؛ جداسازی مگنتوهیدروستاتیکی؛ تکنیک‌های پالایش سطح؛ تست غیرمخرب؛ تحقیق‌های الگوی دامنه؛ ذرات مغناطیسی و نانومهره‌های مغناطیسی چندکاره؛ جداسازی یاخته ازطریق مغناطیسی؛ عامل‌های کنتراست مغناطیسی مثلاً در MRI؛ فوقِ گرمادهی به تومورها؛ اِعمالِ دارو از طریق مغناطیسی.

کاربردهای اصلی‌تر با توضیح مختصری پیرامون هریک به‌زودی در این مقاله ارائه می‌شود.

به این ترتیب، آنچنانکه دیدیم فروسیال (یا ferrofluid) مایعی است که در حضور یک میدان مغناطیسی به‌شدت قطبیده می‌شود. فروسیال‌ها مخلوط‌های کلوئیدی متشکل از ذرات نانوابعاد فرومغناطیسی یا فری‌مغناطیسی می‌باشند که در یک مایعِ حامل که معمولاً یک حلّال یا آب است به حالتِ تعلیق قرار دارند. ذرات نانوابعاد فرومغناطیسی با یک عاملِ ترساز پوشش داده می‌شوند تا ذرات بر اثر نیروهای وان‌دِروالسی یا مغناطیسی دچارِ توده‌شدگی نشوند. برخلافِ نامشان، فروسیال‌ها پدیده‌ی فرومغناطیسم را به‌نمایش نمی‌گذارند زیرا آنها مغناطیس‌شدگی را در غیاب یک میدانِ اِعمال‌شده‌ی خارجی نگاه نمی‌دارند. درواقع، فروسیال‌ها عمدتاً پدیده‌ی پارامغناطیسم را به نمایش می‌گذارند و غالباً به‌خاطرِ فروگیریِ مغناطیسیِ بالای آنها، به‌عنوان سوپرپارامغناطیس توصیف می‌شوند. ساختِ مایع‌های مغناطیسیِ دائمی درحالِ‌حاضر مشکل است [19].

تفاوت بین فروسیال‌ها و سیال‌های مغناطورئولوژی (magnetorheological or MR fluids) در اندازه‌ی ذرات است. ذرات در یک فروسیال عمدتاً متشکل از ذرات نانوابعادند که با حرکت‌های براونی به حالت تعلیق باقی می‌مانند و عموماً تحت شرایط عادی ته‌نشین نمی‌شوند. ذراتِ سیالِ MR عمدتاً متشکل از ذرات میکرومتری (با ابعادی به اندازه‌ی 10 تا 1000 مرتبه بزرگتر) هستند که بیش از آن سنگینند که حرکت براونی بتواند آنها را در حالت تعلیق نگاه دارد ولذا بر اثر اختلافِ چگالیِ ذاتی بین ذره و مایع حامل به مرورِ زمان ته‌نشین می‌شوند. درنتیجه، این دو سیال کاربردهای بسیار متفاوتی دارند. سیالِ MR در حضورِ میدان مغناطیسی، سِفت و محکم می‌شود.

توصیف

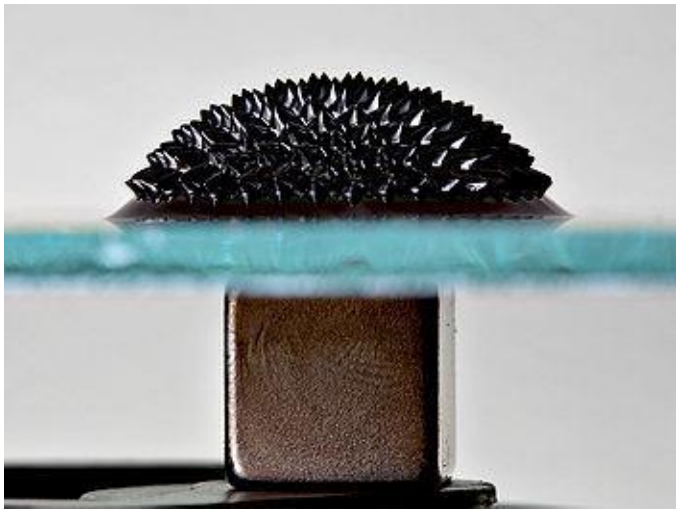
باز همانگونه که قبلاً اشاره شد فروسیال‌ها متشکل از ذرات نانوابعاد (به قطرِ معمولاً 10 نانومتر یا کمتر) از جنسِ magnetite، یا hematite یا ترکیباتِ دیگرِ حاویِ آهن می‌باشند. این ابعاد آنقدر کم هستند که آشفتگیِ گرمایی، آنها را به‌طورِ یکنواخت در یک مایعِ حامل پراکنده کند، و نیز آنقدر کم هستند که خودِ ذرات در واکنش‌های سراسریِ مایع شرکت می‌کنند. این موضوع، قابلِ قیاس است با طریقه‌ای که یون‌ها در یک محلولِ آبکی نمکیِ پارامغناطیسی (مثل یک محلولِ آبکیِ سولفات مس (2) یا کلرید منگنز (2)) محلول را پارامغناطیس می‌سازند.

درواقع، فروسیال‌ها ذرات آهنیِ بسیار ریزی هستند که با یک لایه‌ی مایع و نیز ترساز پوشش داده شده‌اند و سپس به آب یا روغن اضافه شده‌اند که به آنها خواص مایع را می‌دهد. فروسیال‌ها، سوسپانسیون‌های کلوئیدی هستند، یعنی موادی با خواصی بیش از خواصِ یک حالت از ماده. در این مورد، دو حالت از ماده عبارتند از فلز جامد و مایعی که فلز در آن واقع است. این توانایی تغییرِ فاز، همراه با اِعمالِ میدان مغناطیسی، به آنها اجازه می‌دهد به‌عنوانِ درزبندها و روان‌سازها و حتی در کاربردهای بیشتر در سیستم‌های آینده‌ی نانوالکترومکانیک مورد استفاده قرار گیرند.

فروسیال‌های کامل، پایدارند. این به این معناست که ذرات جامد، حتی تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسیِ بسیار شدید، دچار تودەشدگی یا جداییِ فاز نمی‌شوند. اما عاملِ ترساز در طول زمان (چندساله) متمایل به شکسته شدن می‌باشد و نهایتاً نانوذرات، دچار تودەشدگی خواهند شد و از مایع جدا شده و دیگر در واکنشِ مغناطیسی سیال شرکت نخواهد کرد.
فروسیال‌ها، خواص مغناطیسیِ خود را در دماهای به‌اندازه‌ی کافی بالا، که دمای کوری خوانده می‌شوند، ازدست می‌دهند. دمای ویژه‌ی کوریِ مورد نیاز، برحسبِ ترکیب‌های ویژه‌ی مورد استفاده برای نانوذرات، ترساز، و مایعِ حامل، متغیر است.

ناپایداری در میدانِ عمودی

هنگامی که یک سیال پارامغناطیسی، تحت اِعمالِ یک میدانِ مغناطیسیِ عمودیِ به‌اندازه‌ی کافی قوی قرار می‌گیرد سطح سیال به‌طورِ خودبه‌خودی به‌صورتِ یک الگوی شیاردار یا متموجِ منظم فُرم می‌گیرد؛ این اثر، ناپایداری در میدان عمودی خوانده می‌شود. تشکیل الگوی شیاردار یا متموج، انرژیِ آزاد سطحی و انرژیِ گرانشیِ مایع را افزایش و انرژی مغناطیسی را کاهش می‌دهد. این الگو تنها در بالای میدان‌های مغناطیسی بحرانیِ شدیدی شکل می‌گیرد که در معادله‌های مربوط به آنها جملات مربوط به کاهش انرژیِ مغناطیسی مهمتر از موارد مربوط به افزایشِ انرژی سطحی و گرانشی باشد. فروسیال‌ها، فروگیریِ مغناطیسی بسیار بالایی دارند و میدان مغناطیسیِ بحرانی برای شروع تشکیل الگوی شیاردار یا متموج می‌تواند با یک میله‌ی مغناطیسیِ کوچک حاصل و این پدیده قابلِ رؤیت شود.



ترساز‌هایِ معمولِ فروسیال

ترساز‌های مورد استفاده برای پوشش نانوذرات، شامل اما نه محدود به مواردِ زیرند:

- اسید اولئیک
- هیدروکسید تترامتیل آمونیم
- اسید سیتریک
- [soy lecithin [20

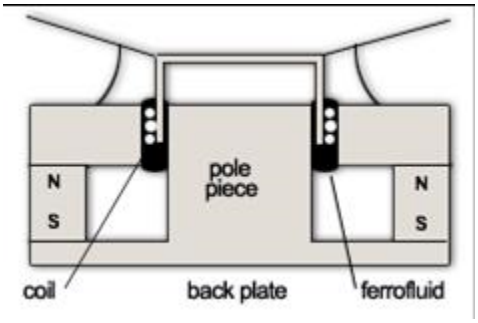
همانگونه که گفتیم این ترساز‌ها مانع می‌شوندکه نانوذرات به‌یکدیگر بچسبند و لذا اطمینان حاصل می‌شود که ذرات، توده و آنقدر سنگین نمی‌شوند که نتوانند تحت حرکت براونی به حالتِ تعلیق نگاه داشته شوند. ذرات مغناطیسی در یک فروسیالِ ایده‌آل، حتی وقتی در معرضِ یک میدان مغناطیسی یا گرانشیِ قوی هستند ته‌نشین نمی‌شوند. یک مولکولِ ترساز، دارای سَری قطبی و دُمی غیرقطبی (یا برعکس) می‌باشد، که یکی از آن دو دچارِ جذب سطحی بر یک نانوذره می‌شود درحالیکه دیگری به‌صورتِ برآمده در مایعِ حامل واقع می‌شود و بدین‌ترتیب یک انبوه‌شدگیِ شیمیاییِ میکروسکوپیِ (micelle) مستقیم یا معکوس در اطراف ذره شکل می‌گیرد [21]، سپس دافعه‌ی فضایی، مانعِ تودەشدگیِ ذرات می‌گردد.

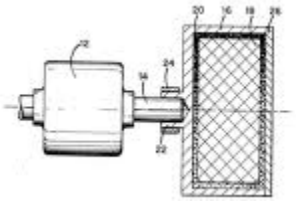
درحالیکه ترسازها در طولانی کردنِ سرعتِ ته‌نشینی در فروسیال‌ها مفیدند، زیانِ آنها در خواص مغناطیسی سیال (به‌ویژه اشباع مغناطیسی سیال) نیز ثابت شده است. اضافه نمودنِ ترسازها (یا ذرات خارجیِ دیگر) چگالی فشردگیِ فروذرات را در حالی که در حالتِ فعال شده‌ی خود هستند کاهش می‌دهد ولذا ویسکوزیته‌ی حالتِ سیال کاهش می‌یابد که منجر به یک سیالِ فعال شده‌ی نَرم‌تر می‌شود. در حالی که ویسکوزیته‌ی حالت (یا سِفتیِ سیالِ فعال شده) برای بعضی از کاربردهای فروسیال‌ها از اهمیتِ چندانی برخوردار نیست برای اغلبِ کاربردهای تجاری و صنعتیِ آنها یک خاصیتِ عمده‌ی سیال تلقی می‌شود، و بنابراین در این موارد، لازم است توازنی بین ویسکوزیته‌ی حالت آن و سرعتِ ته‌نشینی برقرار نماییم.

کاربردهای عمده

در وسایل الکترونیکی

از فروسیال‌ها به‌عنوان درزبندهای مایع در اطراف شافت‌های گردنده‌ی درایوِ هارددیسک‌ها استفاده می‌شود. در اطراف و در مجاورتِ نزدیکِ شافتِ گردنده، آهنربا وجود دارد. مقدار کمی فروسیال که در گاف بین آهنربا و شافت واقع می‌شود با جذب شدنش به آهنربا در سرِ جایِ خود ثابت می‌مانَد و در عینِ حال به علتِ مایع بودن، اصطکاکِ چندانی با شافت گردنده، که در تماس با فروسیال است، ندارد. به این ترتیب فروسیال، همچون مانعی برای ورود چیزها و آت و آشغال‌های ریز به داخلِ درایوِ هارد عمل می‌کند. مهندسین شرکت فروتک (www.ferrotec.com) [Ferrotec Corporation] اعتقاد دارند درزبندی فروسیال روی شافت‌های گردنده نوعاً فشارِ 3 تا 4 psi را تحمل می‌کند، اما این نوع درزبندها برای درزبندی انتقالی برای پیستون‌ها مناسب نیستند و سیال به‌طورِ مکانیکی به خارج از ناحیه‌ی گاف مغناطیسی کشیده می‌شود. سازندگان متعدد دیگری نیز برای این نوع درزبندهای فروسیال وجود دارد [22 تا 26].





در مهندسیِ مکانیک

فروسیال‌ها قابلیتِ کاهش اصطکاک دارند. اگر از آنها بر روی سطح یک آهنربا که به اندازه‌ی کافی قوی هست، مثل آهنربایی ساخته شده از نودیم، استفاده شود می‌توانند باعث شوند که آهنربا به‌آسانی، با کمترین مقاومت، روی سطحِ هموار، سُر بخورَد.

در موارد نظامی

نیروی هواییِ آمریکا یک رنگ از نوع ماده‌ی جاذب رادار (RAM یا Radar Absorbent Material) [27 تا 31] معرفی کرده است که هم از فروسیال‌ها و هم از مواد غیرمغناطیسی ساخته شده است. با کاهشِ انعکاس امواج الکترومغناطیسی، این ماده کمک می‌کند که سطحِ مقطعِ راداریِ هواپیما کاهش یابد.

در هوا-فضا

ناسا استفاده از فروسیال‌ها را در یک حلقه‌ی بسته به‌عنوانِ مبنایی برای یک سیستمِ کنترل حالتِ فضاپیماها آزمایش کرده است. یک میدان مغناطیسی، به یک حلقه‌ی فروسیال اِعمال می‌شود تا اندازه حرکتِ زاویه‌ای را تغییر دهد و روی گردش فضاپیما تأثیر بگذارد.

در تجهیزاتِ آنالیز

فروسیال‌ها به‌خاطرِ خواص انکساریشان کاربردهای اپتیکیِ متعددی دارند زیرا هر دانه یا میکروآهنربا در فروسیال، نور را بازتاب می‌کند. از جمله‌ی این کاربردها، اندازه‌گیریِ ویسکوزیته‌ی ویژه‌ی یک مایعِ واقع شده بینِ یک قطبنده (یا پلاریزور) و یک آنالیزور است که به‌وسیله‌ی یک لیزرِ هلیم-نئون روشن می‌شود.

در پزشکی

در پزشکی از فروسیال‌ها به‌عنوانِ عاملِ کنتراست برای تصویربرداریِ تشدیدِ مغناطیسی (MRI) استفاده می‌شود که می‌تواند برای آشکارسازی سرطان قابلِ استفاده باشد. در این مورد، ذراتِ مغناطیسیِ فروسیال، نانو ذرات اکسید آهن هستند و SPION نامیده می‌شوند. همچنین آزمایش‌های زیادی با استفاده از فروسیال‌ها در یک عملِ جراحیِ آزمایشیِ سرطان، به نامِ فوقِ عملِ مغناطیسی، انجام شده است. اساسِ این عمل بر این واقعیت استوار است که یک فروسیالِ واقع شده در یک میدان مغناطیسیِ متناوب، گرما آزاد می‌کند [32 تا 35].

در انتقال گرما

یک میدان مغناطیسیِ خارجیِ اِعمال شده بر یک فروسیال با فروگیریِ متغیر (که فروگیریِ متغیرِ آن مثلاً بر اثرِ یک شیبِ دما حاصل شده باشد) منجر به یک نیروی بدنه‌ی مغناطیسیِ غیریکنواخت می‌شود که باعثِ ایجادِ شکلی از انتقالِ گرما به‌نامِ همرفت ترمومغناطیسی می‌شود [36]. این شکل از انتقال گرما هنگامی می‌تواند مفید باشد که انتقال گرما در همرفت معمول کافی نباشد مثلاً در دستگاه‌های کوچک-مقیاسِ مینیاتوری یا تحت شرایط جاذبه‌ی ثقلیِ اندک.

به‌طور عادی از فروسیال‌ها در بلندگوها به منظورِ دور کردنِ گرما از کویلِ صدا استفاده می‌شود. فروسیال‌در گافِ هواییِ اطراف کویل صدا قرار می‌گیرند و در آنجا تحت جاذبه‌ی آهنربای بلندگو ثابت می‌مانند. ار آنجا که فروسیال‌ها پارامغناطیس هستند از قانون کوری تبعیت می‌کنند وبنابراین در دماهای بیشتر دارای خاصیتِ آهنربایی کمتری هستند. یک آهنرباِی قویِ قرار گرفته در نزدیکیِ کویل صدا که تولید گرما می‌کند فروسیالِ سرد را بیش از فروسیال گرم جذب می‌کند و بنابراین فروسیالِ گرم شده از کویل الکتریکیِ صدا، به طرفِ سینک گرما بیرون رانده می‌شود. این، یک روشِ سردسازیِ مؤثر است که نیازی به هیچ انرژیِ ورودیِ اضافه‌ای ندارد [37].

در نورشناسی

تحقیقاتی برای درست کردنِ یک آینه‌ی مغناطیسیِ متغیرالشکل از فروسیال برای تلسکوپ‌های نجومی مستقر بر روی زمین در راه است [38].

در هنر

بعضی از موزه‌های هنر و علوم، دستگاه‌های نمایشیِ ویژه‌ای دارند که در آنها از آهنربا استفاده می‌شود تا فروسیال را به روشی فواره‌گونه، وادار به حرکت (آرام) به گِردِ سطوحی که به‌گونه‌ی ویژه‌ای شکل داده شده‌اند نمایند تا میهمانان سرگرم شوند [39].

مراجع

S. ODENBACH (Editor), Ferrofluids: Magnetically controllable fluids and their applications, [1]
(Lecture Notes in Physics, Springer-Verlag, 253 pages (2002

S. W. CHARLES, The preparation of magnetic fluids, in: S. ODENBACH (Editot), Ferrofluids: [2]
Magnetically controllable fluids and their applications, Lecture Notes in Physics, Springer-Verlag,
pp. 3-18, 2002, See also: S. W. CHARLES, Preparation and magnetic properties of magnetic
fluids, Rom, Reps. Phys., vol. 47(3-5), pp. 249-264, 1995

R. E. ROSENSWEIG, Ferrohydrodynamics, Cambridge Univ. Press, pp. 344, 1984; see also J. L. [3] Neuringer, R. E. Rosenweig, Phys. Fluids 7(1967)1927

B. BERKOVSKY, V. BASHTOVOI (Eds.), *Magnetic fluids and applications handbook,* [4] Begell House, New York, pp.831, 1996

L. VEKAS, D. BICA, M. V. AVDEEV, Magnetic nanoparticles and concentrated magnetic [5] nanofluids: synthesis, properties and some applications, China Particuology, 2007 (to appear); see also: I. ANTON, I. DE SABATA, L. VEKAS, Application orientated researches on magnetic fluids, J. Magn. Magn. Mater., vol.85, pp.219-226, 1990

K. RAJ, Magnetic fluids and devices: a commercial survey, in: B. BERKOVSKY, V. [6] BASHTOVOI (Eds.), *Magnetic fluids and applications handbook,* Begell House, New York, (pp.657-751 (1996

V. CABUIL, J.C. BACRI, R. PERZYNSKY, YU. RAIKHER, Colloidal stability of magnetic fluids, in: B. [7] BERKOVSKY, V. BASHTOVOI (Eds.), *Magnetic fluids and applications handbook,* Begell House, ,New York

.(pp.33-56 (1996

M.V. Avdeev, V.L. Aksenov, M. Balasoiu, V.M. Garamus, A. Schreyer, Gy. Torok, L. Rosta, D. [8] Bica,. L. Vekas, Comparative analysis of the structure of sterically stabilized ferrofluids on polar carriers by small-angle neutron scattering, J. Coll.Interface Sci., 295(2006)100-107; see also: M.V. Avdeev, Contrast variation in small-angle scattering experiments on polydisperse and .superparamagnetic systems: basic function approach, J. Appl.Cryst., 40(2007)56-70

M. RASA, D. BICA, A.P. PHILIPSE, L. VEKAS, Dilution series approach for investigation of [9] microstructural properties and particle interactions in high-quality magnetic fluids, Eur. Phys. J. .E (2002), vol.7, pp.209- 220

A. O. Ivanov, O. B. Kuznetsova, Interparticle correlations and magnetic properties of [10] .concentrated ferrocolloids, Collod J., vol.63, pp.60-67, 2001

V. Kuncser, G. Schinteie, B. Sahoo, W. Keune, D. Bica, L. Vékás, G. Filoti, Magnetic [11] interactions in water-based ferrofluids studied by Mössbauer spectroscopy. J. Phys.: Cond. Matter. (2007)19(1)016205- 016221

S. Odenbach, Magnetoviscous effects in ferrofluids, Springer LNP m71 (Berlin, New York, [12] 2002) **13.** M.I. Shliomis, Ferrohydrodynamics: Retrospective and Issues, in: S. ODENBACH (Editor), *Ferrofluids: Magnetically controllable fluids and their applications,* Lecture Notes in Physics, Springer-Verlag, pp.85- 110, 2002

M.I. Shliomis, Ferrohydrodynamics: Retrospective and Issues, in: S. ODENBACH (Editor), [13] *Ferrofluids: Magnetically controllable fluids and their applications,* Lecture Notes in Physics, .Springer-Verlag, pp.85- 110, 2002

R. E. Rosensweig, Basic Equations for Magnetic Fluids with Internal Rotations, in: S. [14] ODENBACH (Editor), *Ferrofluids: Magnetically controllable fluids and their applications,* Lecture .Notes in Physics, Springer-Verlag, pp.61 84, 2002

Turcu R., Pana O., Nan A. and Giurgiu L. M. Polymeric Nanostructures and Their [15] Applications vol 1, ed. H.S. Nalwa (American Scientific Publishers) pp 337-99(2007); see also Eunate Goiti, Rebeca Hernández, , Ruy Sanz, Daniel López, Manuel Vázquez, Carmen Mijangos, Rodica Turcu, Alexandrina Nan, Doina Bica, Ladislau Vekas, Novel nanostructured magneto-polymer composites, Journal of Nanostructured Polymers and Nanocomposites . 2(2006)5-12

Z. Varga, J. Feher, G. Filipcsei, M. Zrinyi, Smart nanocomposite polymer gels, [16] Macromolecular Symposia, 200 (2003)93-100.] Z. Varga, G. Filipcsei, M. Zrinyi, Smart .composites with controlled anisotropy, Polymer, 46(2005)7779 7787

Neuberger, T., Schopf, B., Hofmann, H., Hofmann, M. & Rechenberg, B. Superparamagnetic [17] nanoparticles for biomedical applications: Possibilities and limitations of a new drug delivery .system. *J. Magn. Magn. Mater.*, 293(2005) 483 496

Pankhurst, Q.A., Connolly, J., Jones, S.K. & Dobson J. , Applications of magnetic [18] .nanoparticles in biomedicine. *J. Phys. D: Appl.Phys.*, 36(2003) R167-R181

T. Albrecht, C. Buhrer et al. (1997), “First observation of ferromagnetism and ferromagnetic [19] domains in a liquid metal”, Applied A Materiald Science & Processing, **65**:215, doi:10. 1007/s003390050569

Iowa State University Animal Industry Report 2006, Soy Lecithin but not Egg Lecithin [20] Decreased the Plasma Cholesterol Concentration in Golden Syrian Hamsters

M. Seddon, R. H. Templer, Polymorphism of Liquid-Water Systems, from the Handbook of [21] Biological Physics, Vol. 1, ed. R. Lipowsky, and E. Sackmann. (c) 1995, Elsevier Science B. V. ISBN 0-444-81975-4

www.anzcorp.co.kr [22]

www.ekk.co.jp/eng/index.htm [23]

www.rigaku.com/vacuum/ferro.html [24]

www.rigaku-mechatronics.com/english [25]

www.magneticfluidics.com/index-e.asp [26]

en.wikipedia.org/wiki/Radar_Absorbent_Material [27]

www.radarworld.org/radarwar.pdf [28]

www.bbc.co.uk/dna/ww2/A591545 [29]

Shepelev, Andrei and Ottens, Huib. Ho 229 The Spirit of Thuringia: The Hortern All-wing jet [30]
.Fighter. London: Classic Publications, 2007. ISBN 1-903223-66-0

E Knot, J Shaeffer, M Tulley, Radar Cross Section, pp 528-531. ISBN 0-89006-618-3 [31]

(J. Garcia-Otero, A. J. Garcia-Bastida, and J. Rivas, J. Magn. Magn. Mater. 189, 377 (1998 [32]

R. Hergt, R. Hiergeist, M. Zeisberger, D. Schuler, U. Heyen, I. Hilger and W. A. Kaiser, J. Magn. [33]
(Magn. Mater. 293.80 (2005

R. Hergt, R. Hiergeist, I Hilger, W. A. Kaiser, Y. Lapatnikov, S. Margel and U. Richter, J. Magn. [34]
(Magn. Mater. 270, 345 (2004

M. Zeisberger, S. Dutz, R. Muller, R. Hergt, N. Matoussevitch, and H. Bonneman, J. Magn. [35]
(Magn. Mater. 311, 224 (2005

B. Finlayson, Convective instability of ferromagnetic fluids, 1970, Journal of Fluid [36]
Mechanics **40**:753-762

Elmars Blums (1995) "New Applications of Heat and Mass Transfer Processes in [37]
Temperature Sensitive Magnetic Fluids". Brazilian Journal of Physics. Retrieved August 31 2007

Jeff Hecht (07 November 2008). "Morphing mirror could clear the skies for astronomers", [38]
New Scientist

www.kodama.hc.uec.ac.jp/index-e.html [39]