فهرست مطالب

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ای بر خزش و مواد ویسکوالاستیک ۲

۱-۱ مفهوم خزش ۳

۱-۱-۱ تأثیر دمای بالا بر روی ساختار مواد ۴

۱-۱-۲ سوپرپلاستیسیته ۷

۱-۱-۳ آزمون‌های خزش ۷

۱-۱-۴ مراحل خزش ۸

۱-۱-۵ مکانیزم‌های خزش ۹

۱-۱-۶ اثر دما در خزش ۱۴

۱-۲ مواد ویسکوالاستیک ۱۵

۱-۲-۱ تاریخچه مواد ویسکوالاستیک ۱۶

۱-۲-۲ رفتار مواد ویسکوالاستیک ۱۶

۱-۲-۳ رفتار کشسان در قیاس با رفتار ویسکوالاستیک ۲۱

فصل دوم: مروری بر پژوهش های گذشته و بیان مسئله ۲۴

۲-۱ مروری بر پژوهش های گذشته ۲۵

۲-۲ بیان مسئله ۳۶

فصل سوم: شبیه سازی پدیده خزش در مواد ویسکوالاستیک ۳۷

۳-۱ مدلسازی هندسی ۳۸

۳-۲ تعریف ویژگی های مکانیکی ماده ۳۹

۳-۳ ورود به محیط مونتاژ ۴۱
۳-۴ تعیین مراحل حل ۴۱
۳-۵ تعیین شرایط مرزی و نیروها ۴۳
۳-۶ مش بندی ۴۴
فصل چهارم: بررسی نتایج ۴۶
۴-۱ بررسی استقلال از مش ۴۷
۴-۲ مقایسه و اعتبارسنجی ۴۷
۴-۳ بررسی تنش، کرنش و تغییر شکل ۴۹
۴-۴ بررسی تاثیر فشار داخلی ۶۱
۴-۵ بررسی تاثیر دمای اولیه ۶۲
فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادات ۶۴
۵-۱ نتیجه گیری ۶۵
۵-۲ پیشنهادات ۶۷
مراجع ۶۹

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ : پره توربین سالم و پره توربین آسیب دیده تحت اثر خزش [۱].....۳

شکل ۱-۲ : پره های موتور جت در دمای بالا و نزدیک به ذوب ۵

شکل ۱-۳ : نمودار کرنش برحسب زمان برای دماهای پایین و دماهای بالا [۴] ۶

شکل ۱-۴ : نمودار کرنش-زمان یک جسم تحت تأثیر خزش و مراحل خزش در روش بار ثابت [۶] ۹

شکل ۱-۵ : نواحی عاری از رسوبات در مجاور مرزهای دانه عمود بر محور کشش [۷].....۱۱

شکل ۱-۶ : طرح شماتیک خزش نفوذی نابارو-هرینگ [۹].....۱۲

شکل ۱-۷ : طرح شماتیک خزش نفوذی کوبل [۹] ۱۳

شکل ۱-۸ : نمودار تنش–کرنش جامدات کشسان [۱۳] ۱۷

شکل ۱-۹ : نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برش برای سیالات [۱۳].....۱۷

شکل ۱-۱۰ : (a) روند تغییر کرنش و (b) روند تغییر تنش برای یک ماده ویسکوالاستیک با گذشت زمان [۱۴] ۱۹

شکل ۲-۱ : منحنی سفتی خزش برحسب زمان بارگذاری برای دماهای متفاوت [۲۱] ۲۵

شکل ۲-۲ : منحنی سفتی خزش برحسب زمان بارگذاری برای مدل های متفاوت [۲۱].....۲۶

شکل ۲-۳ : الف) توزیع تنش فون میسز ب) توزیع تنش ترسکا [۲۲] ۲۷

شکل ۲-۴ : کرنش خزشی مماسی در دماهای متفاوت [۲۳] ۲۸

شکل ۲-۵ : کرنش خزشی شعاعی در دماهای متفاوت [۲۳].....۲۸

شکل ۲-۶ : مقایسه بین مدل کلاسیک و مدل های فراکتال [۲۴].....۲۹

شکل ۲-۷ : کرنش خزشی شعاعی در زمان های متفاوت [۲۵].....۳۰

شکل ۲-۸ : تنش خزشی شعاعی در زمان های متفاوت [۲۵] ۳۰

شکل ۹-۲ : کرنش خزشی در درصدهای حجمی متفاوت ذرات [۲۶].....۳۱
شکل ۱۰-۲ : تنش میانگین بر حسب کرنش نرمال و کرنش برشی [۲۷] ۳۲
شکل ۱۱-۲ : منحنی کرنش برحسب زمان برای دماهای متفاوت [۲۸] ۳۳
شکل ۱۲-۲ : منحنی نرخ سازگاری خزش برحسب زمان برای دماهای متفاوت [۲۸].....۳۳
شکل ۱۳-۲ : نمودار کرنش خزشی برحسب زمان در فشارهای متفاوت [۲۹] ۳۴
شکل ۱۴-۲ : نمودار تنش خزشی در زمان های متفاوت [۲۹].....۳۵
شکل ۱۵-۲ : نمودار کرنش خزشی برحسب زمان در کسر حجمی های متفاوت [۳۰].....۳۵
شکل ۱-۳ : ابعاد و اندازه های لوله جدارضخیم ۳۸
شکل ۲-۳ : مدلسازی هندسی لوله جدارضخیم.....۳۹
شکل ۳-۳ : تعیین مشخصات مکانیکی لوله ویسکوالاستیک.....۴۰
شکل ۴-۳ : وارد کردن قطعه به محیط مونتاژ ۴۱
شکل ۵-۳ : تعریف گام ویسکو برای مدلسازی پدیده خزش.....۴۲
شکل ۶-۳ : اعمال بار فشاری به سطح داخلی لوله ۴۳
شکل ۷-۳ : تعریف دمای اولیه.....۴۴
شکل ۸-۳ : مش بندی ناحیه محاسباتی.....۴۵
شکل ۱-۴ : نتایج تنش و کرنش خزشی در چندین اندازه المان مختلف.....۴۷
شکل ۲-۴ : توزیع تنش برآیند در ابتدای مرحله خزش (شکل کامل و شکل برش خورده).....۴۹
شکل ۳-۴ : توزیع تنش برآیند در انتهای مرحله خزش (شکل کامل و شکل برش خورده).....۴۹
شکل ۴-۴ : توزیع کرنش برآیند در ابتدای مرحله خزش (شکل کامل و شکل برش خورده) ۵۰
شکل ۵-۴ : توزیع کرنش برآیند در انتهای مرحله خزش (شکل کامل و شکل برش خورده) ۵۱

شکل ۴-۶ : توزیع کرنش خزشی در ابتدای مرحله خزش (شکل کامل و شکل برش خورده).....۵۱
شکل ۴-۷ : توزیع کرنش خزشی در انتهای مرحله خزش (شکل کامل و شکل برش خورده) ۵۲
شکل ۴-۸ : توزیع جابجایی برآیند در ابتدای مرحله خزش (شکل کامل و شکل برش خورده).....۵۲
شکل ۴-۹ : توزیع جابجایی برآیند در انتهای مرحله خزش (شکل کامل و شکل برش خورده).....۵۳
شکل ۴-۱۰ : نقطه بحرانی تنش و کرنش خزشی ۵۳
شکل ۴-۱۱ : نمودار تنش برآیند بر حسب زمان در نقطه بحرانی ۵۴
شکل ۴-۱۲ : نمودار کرنش برآیند بر حسب زمان در نقطه بحرانی.....۵۴
شکل ۴-۱۳ : نمودار کرنش خزشی بر حسب زمان در نقطه بحرانی ۵۵
شکل ۴-۱۴ : نمودار جابجایی برآیند بر حسب زمان در نقطه بحرانی ۵۵
شکل ۴-۱۵ : نمودار تنش برآیند بر حسب کرنش برآیند در نقطه بحرانی.....۵۶
شکل ۴-۱۶ : الف) مسیر شماره ۱ ب) مسیر شماره ۲ .....۵۷
شکل ۴-۱۷ : نمودار تنش برآیند در راستای مسیر ۱ .....۵۷
شکل ۴-۱۸ : نمودار تنش برآیند در راستای مسیر ۲ .....۵۸
شکل ۴-۱۹ : نمودار کرنش برآیند در راستای مسیر ۱.....۵۸
شکل ۴-۲۰ : نمودار کرنش برآیند در راستای مسیر ۲.....۵۹
شکل ۴-۲۱ : نمودار جابجایی برآیند در راستای مسیر ۱ .....۵۹
شکل ۴-۲۲ : نمودار جابجایی برآیند در راستای مسیر ۲ .....۶۰
شکل ۴-۲۳ : نمودار تغییرات تنش برآیند بر حسب فشار داخلی لوله برای نیروهای کششی مختلف.....۶۱
شکل ۴-۲۴ : نمودار تغییرات کرنش خزشی بر حسب فشار داخلی لوله برای نیروهای کششی مختلف ۶۱
شکل ۴-۲۵ : نمودار تغییرات تنش برآیند بر حسب دمای اولیه لوله ۶۲

شکل ۲۶-۴ : نمودار تغییرات کرنش خزشی بر حسب دمای اولیه لوله ۶۳

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۳ : ویژگی های الاستیک و حرارتی ماده ۴۰

جدول ۱-۴ : مقادیر استحکام کششی در تحقیق حاضر و مرجع [۲۹]..... ۴۸

فهرست علائم و اختصارات

نماد	توضیح (واحد)
T	دما (سلسیوس)
Q	انرژی فعالسازی (ژول)
R	ثابت بولتزمان
Ω	حجم اتمی (مترمکعب)
E	مدول یانگ (پاسکال)
v	ضریب پواسون
ρ	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
U	جابجایی خطی (متر)
UR	جابجایی دورانی (رادیان)
V	سرعت خطی (متر بر ثانیه)
τ	تنش برشی (پاسکال)
σ	تنش محوری (پاسکال)
e	کرنش
Y	تنش تسلیم (پاسکال)
t	زمان (ثانیه)
F	نیرو (نیوتن)

چکیده

ویسکوالاستیسیته خاصیت دسته‌ای از مواد است که رفتاری میان دو خاصیت کلی ویسکوز بودن و کشسان بودن از خود نشان می‌دهند و این خاصیت به هنگام تحمیل نیروی خارجی و اعمال تغییر شکل بر آن پدیدار می‌شود. با توجه به کاربردهای مختلف مواد ویسکوالاستیک و احتمال رخ دادن پدیده خزش در آنها، بررسی رفتار و مدلسازی پدیده خزش در این مواد از اهمیت و ضرورت بالایی برخوردار است. خزش عبارتست از تغییر شکل آهسته و پیوسته جامد تحت تنش ثابت با زمان که تنها دردماهای بالا رخ می‌دهد. بنابراین در این پایان نامه مدلسازی و تحلیل پدیده خزش در قطعات ویسکوالاستیک و بررسی پارامترهای موثر بر آن انجام خواهد گرفت. برای این منظور، ابتدا یک بررسی کامل در مورد پدیده خزش و دلایل و پارامترهای موثر بر آن ارائه شده و مروری بر مقالات موجود در این زمینه انجام گرفته است. پس از آن تئوری ها و روابط حاکم بر مسئله مورد نظر ارائه شده و سپس شبیه سازی و تحلیل پدیده خزش در مواد ویسکوالاستیک در نرم افزار آباکوس و به روش المان محدود انجام شده و در نهایت پس از اعتبارسنجی مشاهده شده است که مقادیر کرنش برآیند، کرنش خزشی و جابجایی برآیند، بصورت صعودی از زمان شروع پدیده خزش تا انتهای پدیده خزش، افزایش یافته اند. همچنین مشاهده شده است که با افزایش فشار داخلی لوله، مقادیر تنش برآیند ایجاد شده و همچنین کرنش خزشی ایجاد شده در لوله، افزایش یافته است. همچنین مشاهده شده است با افزایش نیروی کششی انتهای لوله از ۷ به ۹ مگاپاسکال، تنش حدود ۳۰ درصد و کرنش حدود ۴۰ درصد کاهش یافته و با افزایش دمای اولیه لوله از ۴۵۰ درجه سلسیوس به ۶۵۰ درجه سلسیوس، تنش حدود ۵ درصد و کرنش حدود ۶ درصد افزایش داشته‌اند.

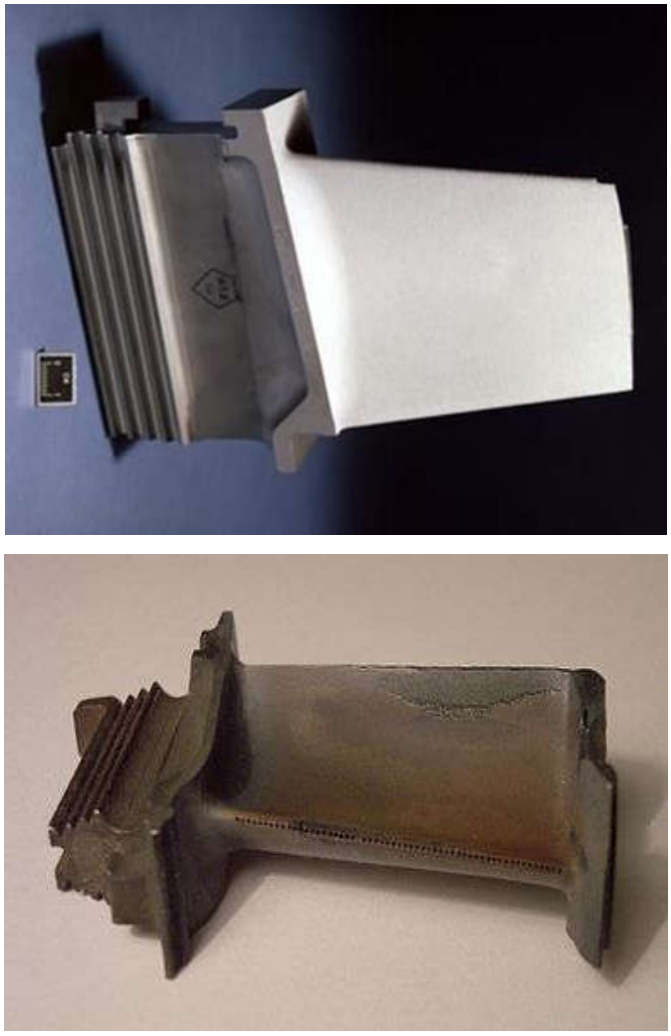
کلمات کلیدی: ویسکوالاستیسیته – خزش – تنش – کرنش - دما

فصل اول:

مقدمه ای بر خزش و مواد ویسکوالاستیک

۱-۱ مفهوم خزش

خزش عبارتست از تغییر شکل آهسته و پیوسته جامد تحت تنش ثابت با زمان که تنها دردماهای بالا رخ می‌دهد، یعنی $T > 0.4T_m$ ، که T_m نقطه ذوب بر حسب واحد کلوین می‌باشد. بطور کلی خزش تابعی پیچیده از تنش، زمان، دما، اندازه و شکل دانه، ریزساختار، کسر حجمی و ویسکوزیته فاز شیشه‌ای در مرز دانه‌ها، تحرک نابجایی‌ها و ... می‌باشد [۱]. شکل ۱-۱ نشان دهنده یک پره توربین سالم و یک پره توربین آسیب دیده تحت اثر خزش می‌باشد.



شکل ۱-۱ : پره توربین سالم و پره توربین آسیب دیده تحت اثر خزش [۱]

شرایط ترمودینامیکی و مشخصه‌های سینتیکی تأثیر بسیار زیادی بر روی ریزساختار ماده دارند، به عنوان مثال پدیده نفوذ، رابطه مستقیمی با دما دارد و این خود تأثیراتی روی خواص مکانیکی مواد و پدیده خزش می‌گذارد.

پدیده خزش در سرامیک‌ها بسیار مهم‌تر از فلزات است، چرا که کاربردهای دما بالا در سرامیک‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. نقش مکانیزم‌های نفوذی خزش در سرامیک‌ها بسیار پیچیده‌تر از فلزات می‌باشد، چون عمدتاً پدیده نفوذ در سرامیک‌ها پیچیده‌تر است. نیاز به خنثی بودن بار نفوذی مختلف برای کاتیون‌ها و آنیون‌ها در این پیچیدگی سهیم‌اند [۲]. خارج شدن اتم‌ها از مناطقی که تحت فشار هستند و قرارگیری آن‌ها در مناطقی که تحت کشش می‌باشند، انرژی آزاد اتم‌ها را تقریباً به مقدار $2\Omega\sigma$ می‌کاهد بطوری‌که در آن σ تنش اعمالی و Ω حجم اتمی می‌باشد. این کاهش انرژی نیروی محرکه خزش در ماده می‌باشد [۳].

۱-۱-۱ تأثیر دمای بالا بر روی ساختار مواد

به‌طور کلی تأثیر دمای بالا بر روی ساختار مواد را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

الف) بالا رفتن سرعت نفوذ

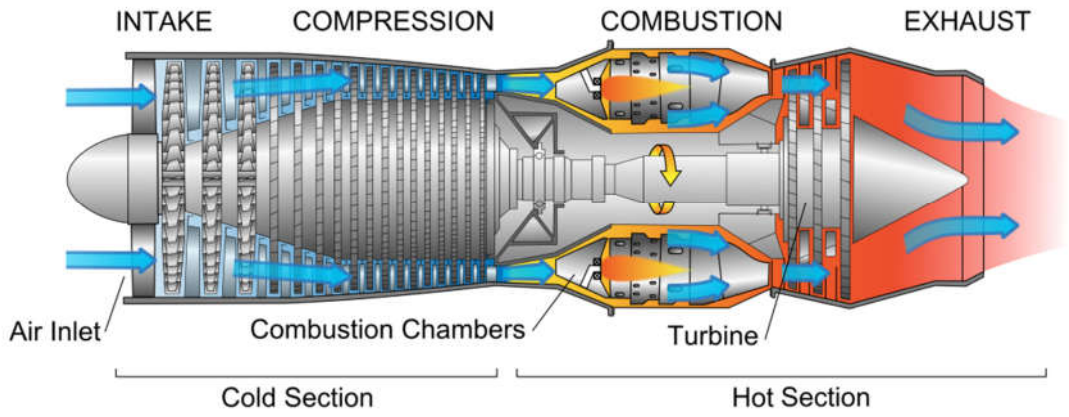
با بالا رفتن دما، تعداد عیوب جای‌خالی[1] بالا می‌رود. با بالا رفتن تعداد جاهای خالی در داخل شبکه کریستالی مواد، سرعت نفوذ افزایش می‌یابد که این خود موجب تغییر در شبکه کریستالی ماده می‌گردد.

ب) انبساط گرمایی

با افزایش دما معمولاً حجم مواد افزایش می‌یابد. این اتفاق در مورد موادی که دارای ناخالصی نیز هستند رخ می‌دهد. به دلیل تفاوت ضریب انبساط گرمایی ماده حل شونده یا رسوب موجود با فاز زمینه،

[1] Vacancy

ذرات حل شـونده تغییر شـکل می‌دهند و این موضـوع باعث ایجاد تنش در شـبکه کریسـتالی ماده می‌شـود؛ بنابراین عملاً مکانیزم‌های استحکام بخشی که مبتنی بر انحلال جامد یا رسوب هستند در دماهای بالا کاربرد ندارند. به عنوان مثال همانطور که در شـکل ۲-۱ مشـاهده شـده، پره های موتور جت به دلیل قرار گرفتن در دمای بالا و نزدیک به ذوب، تحت اثر تنش هایی به مراتب کمتر از تنش تسلیم، دچار تخریب می شوند.



شکل ۲-۱ : پره های موتور جت در دمای بالا و نزدیک به ذوب

ج) پدیده‌های مرتبط با اندازه دانه

معمولاً با تغییر دما شـاهد تغییر در اندازه دانه هسـتیم. به‌طور کلی با افزایش دما، ممکن اسـت اندازه دانه تغییر کند یا ممکن است مرزهای دانه تضعیف شوند و در نتیجه در صفحات لغزش مناسبی، در دماهای بالا نابجایی‌ها رفتار دانه‌ها روی هم بلغزند یا شـبکه کریسـتالی دچار تبلور مجدد شـود و اندازه دانه افزایش یابد.

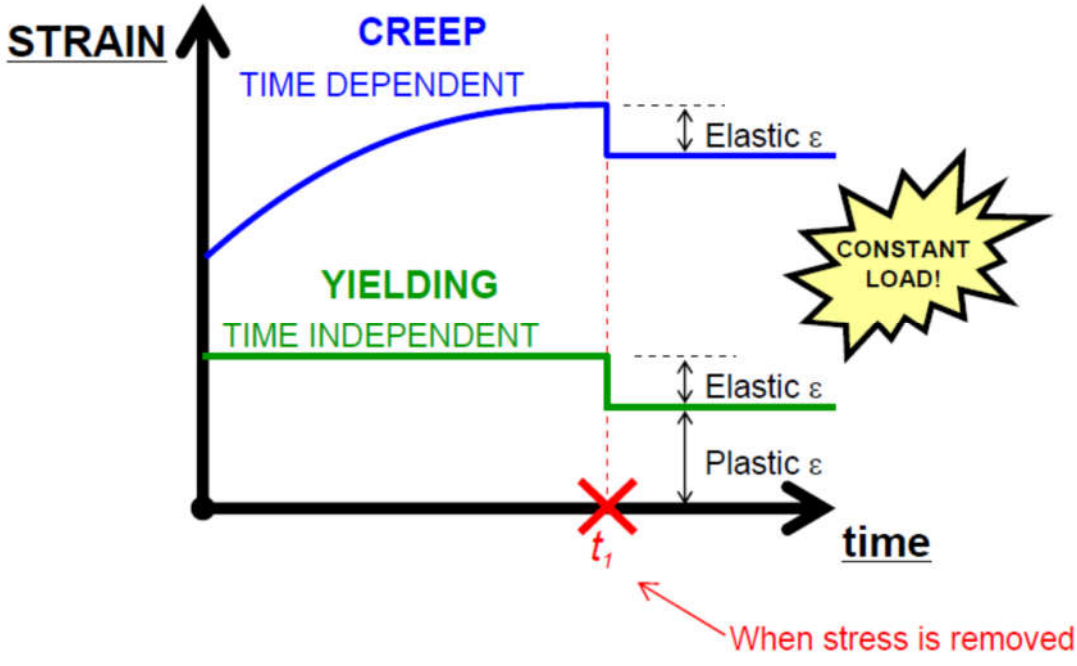
د) پدیده‌های مرتبط با نابجایی‌ها

در دماهای بالا نابجایی‌ها از خود رفتارهای عجیبی بروز می‌دهند، که این رفتارها به هیچ وجه در دماهای پایین قابلیت بروز و ظهور ندارند. در دماهای بالا، نابجایی‌ها ممکن اسـت صـعودیا نزول کنند و سیستم لغزش خود را تغییر دهند یا سیستم لغزش جدیدی در دماهای بالا فعال شـود، حتی ممکن اسـت

چگالی نابجایی‌ها دچار کاهش شـــود. همه این اتفاقات موجب تغییر در خواص مکانیکی ماده مورد نظر می‌شود.

هـ) پدیده‌های مرتبط با تغییر فاز ماده

با افزایش دما امکان تغییر فاز ماده وجود دارد، ممکن اسـت با تغییر فاز ماده شـبکه کریسـتالی ماده تغییر شـکل بدهد که این موجب ایجاد تنش درونی در سـاختار کریسـتالی می‌گردد. همچنین ممکن اسـت با افزایش دما رسـوبات موجود در فاز زمینه حل شـود؛ و همین امر باعث می‌شـود رسـوب مورد نظر که به عنوان مثال برای افزایش اسـتحکام ماده مورد نظر و با اندازه رسـوب خاصـی اضـافه شـده‌اسـت، دیگر کاربردی برای افزایش استحکام ماده نداشته باشد. این امر حتی می‌تواند با تغییر اندازه رسوب موجب کاهش استحکام ماده مورد نظر نیز گردد [۴]. شکل ۳-۱ نشان دهنده عدم وابستگی کرنش در دماهای پایین به زمان، و وابستگی کرنش در دماهای بالا به زمان، می‌باشد.



شکل ۳-۱ : نمودار کرنش برحسب زمان برای دماهای پایین و دماهای بالا [۴]

۲-۱-۱ سوپرپلاستیسیته

سوپر پلاستیسیته و خزش از نظر آنچه بر روی ماده رخ می‌دهد یکسان اند و مفاهیمی بسیار نزدیک به هم هستند، با این تفاوت که سوپر پلاستیسیته یک مکانیزم خودخواسته و مطلوب است، اما خزش مکانیزمی مخرب است.

به کمک سوپرپلاستیسیته می‌توانیم تغییر شکل بسیار زیادی را بر روی جسم اعمال کنیم. کاری که در دماهای پایین، اتفاق نمی‌افتد و موجب شکست و پارگی جسم می‌گردد. سوپرپلاستیسیته در همان شرایطی که خزش رخ می‌دهد به وقوع می‌پیوندد، یعنی در تنش کم، دمای بالا و زمان طولانی.

این روش یکی از روش‌های تغییر شکل متداول برای موادی است که به راحتی تغییر شکل نمی‌دهند، به عنوان مثال برای افزایش طول ورق‌های تیتانیومی از سوپرپلاستیسیته استفاده می‌شود و می‌توان تغییر طول زیادی را بر روی آن ایجاد کرد [۵].

۳-۱-۱ آزمون‌های خزش

به‌طور کلی دو روش معمول برای اندازه‌گیری خزش وجود دارد، که نتایج این آزمایش‌ها به صورت نمودارهای کرنش برحسب زمان در میزان تنش ثابت بیان می‌گردد. دو روش معمول، روش‌های تنش ثابت[۲] و بار ثابت[۳] است. در روش بار ثابت، میزان نیروی وارده به جسم عددی ثابت است و بنابراین با کاهش سطح مقطع جسم، میزان تنش در مقطع جسم افزایش می‌یابد. در روش تنش ثابت میزان نیروی وارده طوری تغییر می‌کند که همواره در مقطع جسم حتی با کاهش سطح مقطع تنش ثابت بماند.

تست‌های خزش به دلیل زمان گیر بودن، ممکن است تا ماه‌ها به طول انجامد.

---

[2] Constant Stress

[3] Constant Load

نتایج آزمون خزش به صورت نمودارهای کرنش زمان بیان می‌شود. بر اساس این نمودارها مراحل خزش را دسته بندی می کنند که در ادامه به آنها اشاره شده است.

۱-۱-٤ مراحل خزش

خزش به‌طور معمول دارای سه مرحله است:

مرحله ۱: در مرحله اول ابتدا شیب زیاد است و سپس کم می‌شود. یعنی نرخ کرنش با گذشت زمان کاهش پیدا می‌کند. در این مرحله اثر کارسختی بیشتر از کار نرمی است.

مرحله ۲: در مرحله دوم نرخ کرنش ثابت می‌شود و نمودار به صورت تقریباً خطی می‌شود. در این مرحله کار سختی و کار نرمی تقریباً به تعادل می‌رسند و موجب ثابت شدن نرخ کرنش می‌گردند.

مرحله ۳: در مرحله سوم نیز به دلیل کاهش چشمگیر سطح مقطع جسم و گلویی شدن، تنش در مقطع جسم به طرز قابل توجهی افزایش یافته و در نتیجه نرخ کرنش (شیب نمودار) افزایش می‌یابد تا این که جسم پاره می‌گردد. در آزمون خزش با روش تنش ثابت، مرحله سوم وجود ندارد و نمودار آن شامل مرحله ۱ و ۲ تا زمان شکست کامل است [۶].

کمترین مقدار نرخ کرنش که در منطقه دوم رخ می‌دهد را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{C\sigma^m}{d^b} e^{\frac{-Q}{RT}} \qquad ۱-۱$$

در این رابطه C ثابت مزبور به نوع ماده، σ تنش اعمالی، d اندازه دانه، Q انرژی فعالسازی برای خزش، b و m ثابت و R ثابت بولتزمان است. شکل ۴-۱ نشان دهنده نمودار کرنش-زمان یک جسم تحت تأثیر خزش و مراحل خزش می‌باشد. این تست با روش بار ثابت انجام پذیرفته است.