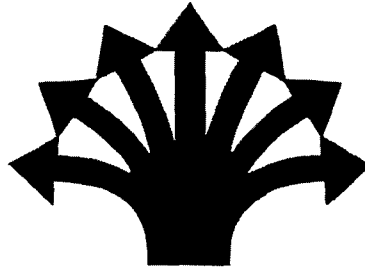


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پژوهشگاه مواد و انرژی

تولید سیلیکون کارباید متخلخل با تقلید از ساختارهای طبیعی

دانشجو:

سعیده کوشکی زمانی

اساتید راهنما:

دکتر علیرضا آقایی

دکتر تورج عبادزاده

استاد مشاور:

دکتر بابک رئیسی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد • ۱ / ۴ / ۱۳۸۸

در رشته مهندسی مواد

استاد مشاور: دکتر بابک رئیسی

تیرماه ۱۳۸۷

۱۱۴۲۵۸

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که همواره مشوق و پشتیبان من بودماند و
دلگامی خیرشان در طی مسیر زندگی بدرقه راهم بوده است.

و

همسر مهربانم که با رهنمودها و کمکهای بی دریغش اسباب
دلگرمی مرا برای ادامه مسیر فراهم ساخته است.

سپاس نامه

اکنون که به مدد لطف یزدان پاک توفیق گذر از کوی دیگری از مسیر پر فراز و نشیب عمر حاصل شد، بر خود لازم می‌دانم از همه کسانی که مرا در طول این راه یاری رسانده‌اند تشکر نمایم.

از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر علیرضا آقایی که انجام این پایان نامه بدون مساعدت ایشان ممکن نبود کمال تشکر را دارم. همچنین از کمک و یاری دلسوزانه آقای دکتر تورج عبادزاده و آقای دکتر بابک رئیسی نهایت سپاس و تشکر را دارم.

از کمک‌های صمیمانه مسئولین تمامی آزمایشگاه‌های پژوهشگاه مواد و انرژی که هر کدام به نوعی اسباب پیشرفت کار را فراهم آورده‌اند، بسیار سپاسگزارم. از خداوند متعال توفیق روزافزون، سلامتی و طول عمر تمامی این عزیزان را خواستارم.

سعیده کوشکی زمانی

چکیده

همانطوریکه می‌دانیم انواع متنوع بدنه‌های سرامیکی متخلخل به طور گسترده در زمینه‌های مختلف مثل فیلترها، کاتالیست‌ها و غشاءها مورد استفاده قرار می‌گیرند، در این میان سیلیکون کارباید به دلیل خواص منحصر به فردی که دارد (مانند: مقاومت به شوک حرارتی، مقاومت به اکسیداسیون و مقاومت به خوردگی در دمای بالا) بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر تولید قطعه‌ای با ساختار تخلخل ناهمسانگرد و هم جهت به وسیله روش‌های سنتی تولید بدنه‌های متخلخل غیر ممکن می‌باشد. با توجه به این مسائل، در این پژوهش سعی شده است که قطعه متخلخل سیلیکون کاربایدی با استفاده از چوب که یک ماده طبیعی و دارای ساختار تخلخل ناهمسانگرد است، به عنوان الگویی برای قطعه سیلیکون کارباید نهایی، سنتز شود.

پس از انتخاب نوع چوب (صنوبر) و برش آنها به ابعاد مشخص، نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در دمای 800°C و در اتمسفر خنثی پیرولیز شدند. در پایان این مرحله یک شابلون کربنی با ساختار مشابه چوب به دست آمد. سپس نمونه‌ها در محفظه خلا با فشار ۱ torr تحت نفوذ سل سیلیکا قرار گرفتند. پس از اینکه مقدار سیلیکا در آنها به میزان استوکیومتری برای انجام کامل واکنش تبدیل به سیلیکون کارباید (یعنی ۱۶۶٪ وزنی کربن) رسید، حرارت‌دهی نمونه‌ها برای انجام واکنش احیاء سیلیکا به وسیله کربن و سنتز بدنه سیلیکون کاربایدی تحت شرایط مختلف انجام شد:

۱. به مدت ۴ ساعت در دمای 1500°C

۲. به مدت ۲ ساعت در دمای 1850°C

۳. در مدت زمان‌های مختلف در کوره مایکروویو با فرکانس ۲/۴۵ GHz و توان ۹۰۰ watt

سپس برای خارج‌سازی کربن باقیمانده، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای 700°C قرار گرفتند.

در نهایت به منظور بررسی امکان سنتز، میزان پیشرفت واکنش، اندازه‌گیری درصد تخلخل و سطح ویژه نمونه‌ها در مراحل مختلف، بررسی ریزساختار و امکان سنجی حفظ ساختار اولیه نمونه در محصول نهایی آنالیزهای زیر پیر روی

نمونه‌ها انجام شد:

OM، BET، SEM، STA ، XRD، کلسیناسیون و هلیم پیکنومتری.

در تمام فرآیندهای حرارت‌دهی ذکر شده سنتز سیلیکون کارباید انجام شد و همچنین ساختار شابلون اولیه در نمونه سنتز شده حفظ شد. در پایان تفاوت نمونه‌های سنتز شده در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

۱	فصل ۱ مقدمه
۲	۱-۱. مقدمه
۴	فصل ۲ مروری بر منابع مطالعاتی
۵	۱-۲. مقدمه
۵	۲-۲. چوب
۷	۱-۲-۲. کربوهیدرات‌ها
۸	۲-۲-۲. ترکیبات فنولیک
۸	۳-۲-۲. تریپن‌ها
۸	۴-۲-۲. اسیدهای خطی
۹	۵-۲-۲. الکل‌ها
۹	۶-۲-۲. پروتئین‌ها
۹	۷-۲-۲. مواد معدنی
۹	۸-۲-۲. مواد آلی دیگر
۱۰	۳-۲. کاربرد سیلیسیم
۱۱	۴-۲. روش‌های سنتز پودر کاربرد سیلیسیم
۱۱	۱-۴-۲. روش اچسون
۱۲	۲-۴-۲. روش پیوسته
۱۲	۳-۴-۲. واکنش مستقیم سیلیسیم و کربن
۱۳	۴-۴-۲. واکنش سیلیس با کربن و کاربرد سیلیسیم
۱۳	۵-۴-۲. واکنش احیاء کربوترمال سیلیس با گرافیت
۱۴	۶-۴-۲. سنتز SiC بر سطح گرم گرافیت
۱۴	۷-۴-۲. واکنش سیلیس کلوئیدی و قیر
۱۴	۸-۴-۲. سنتز SiC از پوسته برنج
۱۵	۹-۴-۲. تهیه پودر SiC از روش فاز بخار CVD
۱۵	۱۰-۴-۲. تشکیل پودرهای فوق ریز SiC با استفاده از لیزر
۱۷	۵-۲. روش‌های سنتز کاربرد سیلیسیم متخلخل با ساختار چوب
۲۰	۱-۵-۲. استفاده از سل نانومتری سیلیکا به عنوان ماده تامین کننده سیلیسیم

۲۰	..... ۱-۱-۵-۲. تغییر دمای پیرولیز چوب
۲۱	..... ۲-۱-۵-۲. تغییر نوع سل مصرفی
۲۱	..... ۳-۱-۵-۲. بهینه سازی فرآیند نفوذدهی
۲۳	..... ۴-۱-۵-۲. احیاء کربوترمال
۲۸	..... ۲-۵-۲. استفاده از فلز سیلیکون به عنوان ماده تامین کننده سیلیسیم
۳۱	..... ۱-۲-۵-۲. سینتیک واکنش
۳۳	..... ۳-۵-۲. استفاده از بخار سیلیکون به عنوان ماده تامین کننده سیلیسیم
۳۹	..... ۶-۲. مایکروویو
۴۰	..... ۱-۶-۲. کوره مایکروویو
۴۰	..... ۱-۱-۶-۲. منبع
۴۱	..... ۲-۱-۶-۲. خطوط انتقال
۴۱	..... ۱-۲-۱-۶-۲. گرداننده‌ها
۴۱	..... ۳-۱-۶-۲. اعمال کننده‌ها
۴۲	..... ۲-۶-۲. برخورد ماده و امواج مایکروویو
۴۲	..... ۳-۶-۲. خواص دی الکتریک‌ها
۴۳	..... ۴-۶-۲. مکانیزم برخورد
۴۳	..... ۵-۶-۲. کاربرد مایکروویو در فرآیندهای حالت جامد

فصل ۳ فعالیت‌های تجربی

۴۷	
۴۸	..... ۱-۳. مقدمه
۴۸	..... ۲-۳. مواد اولیه
۴۸	..... ۳-۳. آنالیز STA
۴۹	..... ۴-۳. پیرولیز چوب
۴۹	..... ۵-۳. نفوذدهی سل سیلیکا به درون شابلون کربنی
۵۱	..... ۱-۵-۳. محاسبه مقدار استوکیومتری سیلیکا برای انجام کامل واکنش احیاء کربوترمال
۵۱	..... ۶-۳. فرآیند حرارت‌دهی نمونه‌های نفوذ داده شده
۵۱	..... ۱-۶-۳. حرارت‌دهی در کوره
۵۲	..... ۲-۶-۳. حرارت‌دهی در دستگاه مایکروویو
۵۳	..... ۷-۳. کربن زدایی
۵۵	..... ۸-۳. بررسی فازی به وسیله پراش پرتو X
۵۵	..... ۹-۳. مشاهده تخلخل‌های شابلون کربنی به وسیله میکروسکوپ نوری (OM)
۵۵	..... ۱۰-۳. بررسی ریزساختار به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی
۵۶	..... ۱۱-۳. اندازه‌گیری سطح ویژه (BET)

۳-۱۲. تعیین میزان تخلخل به وسیله دستگاه هلیم پیکنومتر..... ۵۶

فصل ۴ نتایج و بحث ۵۸

۴-۱. مواد اولیه..... ۵۹

۴-۲. پیرولیز چوب..... ۶۱

۴-۳. اشباع نمونه پیرولیز شده توسط سل سیلیکا..... ۶۷

۴-۴. حرارت دهی نمونه های اشباع شده در کوره..... ۷۲

۴-۵. بررسی توزیع فاز SiC در نمونه سنتز شده..... ۸۵

۴-۶. حرارت دهی کامپوزیت های سیلیکا/کربن به وسیله امواج مایکروویو..... ۸۸

۴-۷. کربن زدایی..... ۹۱

فصل ۵ نتیجه گیری ۹۴

۵-۱. نتیجه گیری..... ۹۵

مراجع ۹۷

- شکل ۲-۱. نمایی از ساختار چوب در جهات مختلف ۷
- شکل ۲-۲. نمایی از کوره اچسون ۱۱
- شکل ۲-۳. انواع مختلف مواد سرامیکی حاصله از بافت های طبیعی ۱۷
- شکل ۲-۴. تکنولوژیهای مختلف تبدیل مواد بایوار گانیک به سرامیک های ساختاری ۱۸
- شکل ۲-۵. تصاویر SEM افزایش دانسیته قطعه سیلیکون کارباید با افزایش دما ۲۵
- شکل ۲-۶. تصاویر SEM افزایش استحکام در صورت استفاده از مخلوط فنولیک رزین و سل سیلیکا ۲۷
- شکل ۲-۷. طرز قرار گیری نمونه های پیرولیز شده در سیلیکون مذاب ۲۸
- شکل ۲-۸. طرز قرار گیری شابلون های کربنی در معرض بخار سیلیکون ۳۴
- شکل ۲-۹. نمایی از تغییر در ساختار دانه سیلیکون کارباید در راستای صفحه (۰۰۱) ۳۵
- شکل ۲-۱۰. نمایی از رشد کریستالی سیلیکون کارباید در جهت شعاعی ۳۶
- شکل ۲-۱۱. نمونه سیلیکون کارباید سنتز شده به روش فاز بخار و سپس کلسینه شده ۳۶
- شکل ۲-۱۲. قرار گیری شابلون کربنی در معرض بخار سیلیکون حاصل از مذاب سیلیکون ۳۷
- شکل ۲-۱۳. طول موج و فرکانس اشعه های الکترومغناطیس ۳۹
- شکل ۳-۱. نمایی از رآکتور خلا ۵۰
- شکل ۳-۲. شماتیک قراردهی نمونه در کوره مایکروویو ۵۲
- شکل ۳-۳. منحنی افزایش دما در کوره مایکروویو ۵۳
- شکل ۳-۴. مراحل سنتز قطعه متخلخل سیلیکون کاربایدی ۵۴
- شکل ۴-۱. الگوی پراش پرتو X خاکستر چوب ۵۹
- شکل ۴-۲. آنالیز پراش پرتو X مربوط به سل سیلیکا خشک شده در دمای $100^{\circ}C$ ۶۰
- شکل ۴-۳. نمودار STA چوب صنوبر مورد استفاده تا دمای $1200^{\circ}C$ ۶۲
- شکل ۴-۴. نمودار پراش پرتو X نمونه پیرولیز شده ۶۳
- شکل ۴-۵. تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه پیرولیز شده ۶۴
- شکل ۴-۶. تصویر SEM از نمونه پیرولیز شده ۶۵
- شکل ۴-۷. تصویر SEM از نمونه اشباع شده به وسیله سل سیلیکا ۶۸
- شکل ۴-۸. تصویر الکترون های برگشتی از ابتدای نمونه نفوذ داده شده ۶۹
- شکل ۴-۹. map عنصر سیلیسیم از شکل ۴-۷-ب) ۷۰
- شکل ۴-۱۰. تصویر الکترون های برگشتی از میانه نمونه نفوذ داده شده با سل سیلیکا ۷۱

- شکل ۴-۱۱. نمودار پراش پرتو X نمونه حرارت دهی شده در دمای 1500°C ۷۴
- شکل ۴-۱۲. نمودار پراش پرتو X نمونه حرارت دهی شده در دمای 1850°C ۷۶
- شکل ۴-۱۳. تصاویر SEM نمونه های سنتز شده در دمای 1500°C ۷۷
- شکل ۴-۱۴. تصاویر SEM نمونه های سنتز شده در دمای 1850°C ۷۹
- شکل ۴-۱۵. مقایسه نمودارهای جذب نمونه های سنتز شده در دمای 1500°C و 1850°C ۸۰
- شکل ۴-۱۶. تصاویر SEM از ساختار کلی نمونه سنتز شده ۸۲
- شکل ۴-۱۷. تصویر SEM از ویسکرهای SiC تشکیل شده ۸۴
- شکل ۴-۱۸. تصاویر الکترون های برگشتی از قسمت بیرونی نمونه سنتز شده در دمای 1850°C ۸۵
- شکل ۴-۱۹. تصاویر الکترون های برگشتی از میانه نمونه سنتز شده در دمای 1850°C ۸۶
- شکل ۴-۲۰. منحنی افزایش دما در کوره مایکروویو ۸۹
- شکل ۴-۲۱. آزمایش پراش پرتو X نمونه های حرارت دهی شده در دستگاه مایکروویو ۹۰
- شکل ۴-۲۲. تصویر SEM نمونه سنتز شده با کتک امواج مایکروویو به مدت ۲ ساعت ۹۰
- شکل ۴-۲۳. تصویر SEM از ساختار کلی نمونه کربن زدایی شده، با ۱۶۸٪ وزنی نفوذ ۸۵
- شکل ۴-۲۴. تصویر SEM از ساختار کلی نمونه کربن زدایی شده، با ۱۱۰٪ وزنی اشباع ۹۳

جدول ۱-۲. کاربرد سرامیک های حاصل از انواع مختلف چوب.....	۱۹
جدول ۱-۳. مشخصات سل سلیکا مورد استفاده.....	۴۸
جدول ۲-۳. پارامترهای دستگاه پراش پرتو X.....	۵۵
جدول ۳-۳. شرایط اندازه گیری سطح ویژه قطعات.....	۵۶
جدول ۴-۳. شرایط اندازه گیری تخلخل در دستگاه هلیم پیکنومتر.....	۵۷
جدول ۱-۴. ترکیب شیمیایی خاکستر چوب های مختلف.....	۶۰
جدول ۲-۴. در صد کاهش وزن نمونه های سنتز شده در شرایط مختلف در اثر کلسیناسیون.....	۹۱

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- مقدمه

علم بیومیمتیک^۱ انعکاس مشخصات آناتومی بافت‌های طبیعی را در محصول نهایی به وسیله روش‌های فیزیکی و شیمیایی تشریح می‌کند [۱]. چوب مثال خوبی از مواد طبیعی است که به لحاظ ساختاری بهینه شده‌اند و خواص زیر را در خود جمع کرده است: وزن سبک، تخلخل بالا و جهت‌گیری شده، سطح ویژه و استحکام ویژه زیاد [۲]. از طرف دیگر قابلیت اعمال تکنیک‌های شکل‌دهی متنوع، چوب را به یک ماده اولیه جالب برای ساخت سرامیک‌های متخلخل تبدیل کرده است. به علاوه تولید سرامیک‌های متخلخل با ساختار تخلخل ناهمسانگرد به وسیله روش‌های سنتی غیرممکن می‌باشد. در روش‌های سنتی معمولاً^۲ از عوامل تخلخل‌ساز، اکستروژن و... استفاده می‌شود که این روش‌ها تخلخل‌های بزرگ همسانگرد با درصد حجمی زیاد و یا تخلخل‌های ریز با درصد حجمی کم تولید می‌کنند [۲].

تکنولوژی‌های مختلفی برای تبدیل مواد بایوآلی^۲ به سرامیک‌های ساختاری و کامپوزیت‌های سرامیکی در سال‌های اخیر ابداع شده است. به طور کلی آنها را می‌توان به دو گروه تکنیک‌های واکنشی و قالبی^۳ تقسیم کرد [۳].

در تکنیک‌های واکنشی پس از تبدیل شابلون‌های بایوآلی به شابلون‌های بایوکربنی در اتمسفر خنثی، این شابلون‌ها با Si و یا فلزات دیگر برای تبدیل به فازهای کاربیدی واکنش می‌دهند (مثل SiC و TiC) [۳].

از سوی دیگر در تکنیک‌های قالبی، از ریزساختار شابلون بایوآلی فقط به عنوان قالب استفاده می‌شود و به طور کلی کربن این شابلون در ایجاد محصول نهایی به کار گرفته نمی‌شود. در این روش

^۱ Biomimetic
^۲ Bioorganic
^۳ Molding techniques

سطوح داخلی الگوی کربنی با سل‌های اکسیدی که ویسکوزیته کمی دارند پوشش داده شده و سپس عملیات حرارتی برای سوزاندن کربن شابلون و تثبیت لایه های اکسیدی، صورت می‌گیرد. این روش برای سنتز سرامیک‌های اکسیدی بایومورف با تخلخل زیاد به کار می‌رود که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۳]: تیتانیا، آلومینا، مولایت و یا زیرکینا.

از طرف دیگر هر چوبی توزیع اندازه تخلخل ویژه ای دارد و چنین تنوعی کاربرد اینگونه مواد را وسیع می‌کند: ساختارهای با اندازه تخلخل یکنواخت برای صافی‌ها، حامل‌های کاتالیستی و یا غشاءهای چند منظوره کاربرد دارند و ساختارهای غیر یکنواخت برای مثال می‌توانند به عنوان محافظ بایوکاتالیستی در صنایع غذایی و یا برای عملیات بر روی آب ضایعاتی استفاده شوند [۴].

سیلیکون کارباید به دلیل خواص منحصر به فردی که دارد مثل مقاومت به شوک حرارتی، مقاومت به اکسیداسیون، مقاومت به خوردگی و استحکام مکانیکی دما بالا بسیار مورد توجه می‌باشد. فوننی که تاکنون برای تهیه سرامیک سیلیکون کارباید بایومورف به کار رفته است شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. روش سل-ژل/احیاء کربوترمال

۲. نفوذدهی سیلیکون مذاب

۳. نفوذدهی واکنشی بخارهای حاوی سیلیکون

هر کدام از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی است که بنا بر امکانات موجود و کاربرد نهایی قطعه می‌توان یکی از آنها را انتخاب کرد.

با توجه به تجهیزات موجود در پژوهشگاه مواد و انرژی و مزایایی که روش اول نسبت به دو روش دیگر دارد که از جمله آن می‌توان به هزینه تمام شده کم‌تر، روش کار راحت‌تر، امکان سنتز در دماهای کم‌تر و در نهایت محصول با خلوص بیشتر اشاره کرد، در این پژوهش از سل نانومتری سیلیکا به عنوان منبع سیلیسیم و به منظور اشباع شابلون کربنی استفاده شد. در ادامه واکنش احیاء کربوترمال بین شابلون کربنی و سیلیکا به دو روش حرارت‌دهی متفاوت (حرارت‌دهی به کمک امواج میکروویو و حرارت‌دهی در کوره) صورت پذیرفت و در نهایت بدنه متخلخل سیلیکون کاربایدی با ساختار مشابه چوب به دست آمد.

فصل ۲

مروری بر منابع مطالعاتی

۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا مشخصات و خواص چوب به عنوان ماده اولیه مورد استفاده در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس تعریفی از کاربید سیلیسیم به عنوان محصول نهایی ارائه خواهد شد. پس از آن روش‌های سنتز پودر کاربید سیلیسیم به اجمال بیان می‌شوند و در نهایت روش‌های سنتز سیلیکون کارباید متخلخل با ساختار چوب (منابع تامین سیلیکون در این روش‌ها با هم متفاوت است.) که موضوع اصلی مورد چالش در این پروژه می‌باشد به تفصیل بیان خواهد شد. در ادامه از آنجاییکه در بخشی از این پژوهش از امواج مایکروویو به عنوان منبع تامین کننده حرارت استفاده شده است، شرحی بر امواج مایکروویو و دستگاه‌های تامین کننده این امواج آورده شده است. در پایان علت انتخاب روش احیاء کربوترمال و استفاده از سل نانومتری سیلیکا به عنوان منبع تامین کننده سیلیکون بیان گردیده است.

۲-۲- چوب

چوب یک کامپوزیت طبیعی شامل پلی ساکاریدها و لیگنین به عنوان اجزاء بایوپلیمری اصلی و ترکیبات ماکرو مولکولی اضافی مثل انواع چربی، روغن، موم، رزین، شکر، مینرال‌ها، آلکالوئید و... به عنوان اجزاء فرعی می‌باشد. پلی ساکاریدها خود به دو دسته غیر سلولزی (همی سلولز) و سلولز تقسیم می‌شوند. ترکیب عنصری چوب تقریباً عبارتست از ۵۰٪ وزنی C، ۴۳/۴٪ وزنی O، ۶/۱٪ وزنی H، ۰/۲٪ وزنی N و خاکستر ۰/۳٪ وزنی [۵]. ساختارهای مولکولی و ترکیبات بایوپلیمرهای اصلی یعنی سلولز، لیگنین و همی سلولز بسیار پیچیده است و می‌تواند برای انواع مختلف چوب متفاوت باشد. سلولز پلی-ساکارید از اهمیت ویژه‌ای در ساختار میکروسکوپی دیواره سلولی برخوردار است، که یک کامپوزیت طبیعی مستحکم شده به وسیله فیبرهای سلولزی را تشکیل می‌دهد که در زمینه‌ای از همی سلولز و لیگنین

قرار گرفته است. جهت گیری فیبرها در دیواره سلولی تاثیر زیادی بر خواص مکانیکی و رفتار انقباض چوب دارد [۵].

چوب‌ها به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: چوب‌های سخت^۱ و چوب‌های نرم^۲. این سختی یا نرمی به ساختار آناتومی درخت بستگی دارد. هر دو دسته چوب دارای خلل و فرج لوله‌ای هستند که در جهت رشد درخت قرار گرفته‌اند (آوندها). چوب‌های سخت ساختارهای تخلخل بزرگ دارند که کانال-هایی را برای آب یا شیره گیاهی فراهم می‌کنند، در صورتیکه چوب‌های نرم ساختار تخلخل ریزتر و یکنواخت‌تری دارند [۶].

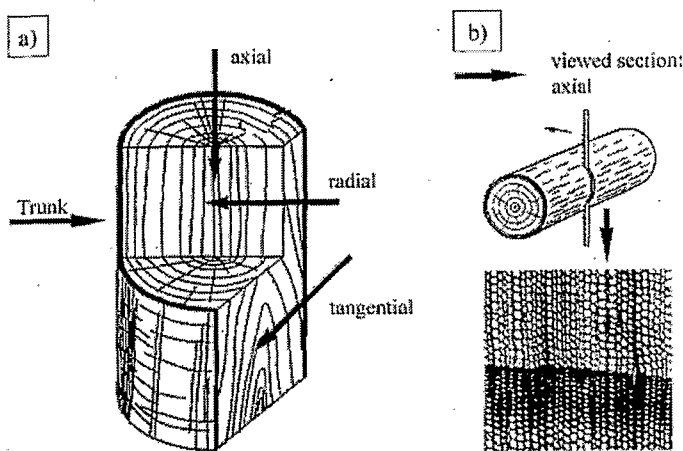
خواص مکانیکی چوب به شدت به جهت اعمال بار نسبت به جهت گیری تخلخل‌ها بستگی دارد (axial, radial and tangential) که همین موضوع چوب را مثال خوبی برای یک ماده ناهمسانگرد می-سازد.

چوب به دلیل خواص ناهمسانگردی که دارد، در جهات مختلف رفتار مکانیکی متفاوتی از خود نشان می‌دهد. استحکام، چقرمگی و مدول الاستیک در راستای موازی با تخلخل‌ها به طور قابل توجهی بیشتر از هنگامی است که اعمال بار در دو جهت دیگر باشد زیرا این جهات به تغییرات تخلخل بسیار حساس‌تر می‌باشند [۵ و ۷].

حرارت‌دهی چوب در یک اتمسفر غیراکسیدی در دماهای بالاتر از 600°C سبب تجزیه اجزاء پلی آروماتیک^۳ شده که در نتیجه بدنه کربنی باقی می‌ماند که دارای ساختار سلولی اولیه چوب می‌باشد.

^۱ hardwoods
^۲ softwoods
^۳ polyaromatic

نتیجه پیرولیز چوب بسته به نوع چوب مورد استفاده سبب یک انقباض آیزوتروپ حدود ۲۰٪ در جهت axial، ۳۰٪ در جهت radial و ۴۰٪ در جهت tangential می شود [۵].



شکل ۱-۲-۱-نمایی از ساختار چوب در جهات مختلف [۸]

۲-۲-۱- کربوهیدرات ها^۴:

کربوهیدرات ها به طور کلی به صورت پلی ساکارید ها که سه چهارم مواد تشکیل دهنده چوب می باشند، وجود دارند. این ترکیبات شامل سلولز و گروه های غیر سلولزی پلی ساکاریدها نظیر همی سلولزها، نشاسته، مواد پکتیک^۵ آرابینوگالاکتون^۶ می باشند. سلولز از ترکیبات اصلی چوب بوده و مقدار آن تا حدود نصف وزن چوب می باشد. قندهای مختلف دیگر نیز در دیواره بیرونی بافت های در حال رویش به وجود می آیند ولی در بافت های چوب بالغ مقدار آنها ناچیز می باشد [۷].

^۴ Carbohydrates
^۵ Pectic
^۶ Arabinogalactones