

تأثیر نوع ساختار و زبری سطح بر زاویه ترشوندگی یک چدن هیپوئوتکتیک با آب

سمیرا ریاحی و بهزاد نیرومند*

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۱۸ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۴/۲۳)

چکیده - در این پژوهش در مورد نوع ریزساختار و زبری سطح بر زاویه ترشوندگی یک چدن هیپوئوتکتیک با آب ارائه می‌شود. به این منظور ابتدا چدن مذاب با سرعتی متفاوت سرد شد و یک نمونه چدن خاکستری با توزیع گرافیت A و یک نمونه چدن دبا ترکیب دست آمد. سپس دو نمونه چدن در حالتی خش شده، چهار مرحله الکترواچ شده و چهار مرحله سنباده زده شده به وسیله از اندازه‌گیری پروفیل زبری، زاویه ترشوندگی آن اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که در مراحل سنباده‌زنی با سنباده ۶۰ و ۸۰ مشاهده شد که برای نمونه چدن سفید زاویه ترشوندگی در مرحله اول (۶۰ درجه) و مرحله سوم (درجه) الکترواچ دست آمد. زاویه ترشوندگی سنباده‌زده شده برای نمونه چدن سفید زاویه ترشوندگی درجه متغیر بود. در ادامه فاکتور زبری سطوح با استفاده از رابطه ونزل و فاکتور کسر جامد در تماس با آب با استفاده از رابطه کسینوس - بکستر محاسبه و زاویه ترشوندگی آن نشان داده شد که در نمونه چدن خاکستری، سطح نمونه پس از مراحل اول و دوم الکترواچ از رابطه کسینوس - بکستر و با افزایش زبری سطح پس از مراحل سوم و چهارم الکترواچ از رابطه ونزل و فاکتور کسر جامد در تماس با سنباده زده شده، رفتار ترشوندگی سطح چدن سفید بسته به زبری سطح، روند ثابت نشان داد.

واژگان کلیدی: زاویه ترشوندگی، زبری سطح، ریزساختار، چدن خاکستری، چدن سفید، الکترواچ، سنباده زدن

* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: behzn@cc.iut.ac.ir

Effect of Structure and Surface Roughness on Wetting Angle of a Hypoeutectic Cast Iron

S. Riahi and B. Niroumand¹

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract: Preliminary results of a research on the effects of microstructure and surface roughness of a hypoeutectic cast iron on its wetting angle are presented in this article. For this purpose, molten cast iron was solidified at different cooling rates to produce two samples of the same composition, i.e. a gray cast iron with A type flake graphite and a white cast iron. Two samples were then prepared in polished, electroetched (four different stages) and mechanically abraded (four different stages) conditions and their wetting angles were measured after evaluating their roughness profile. Maximum and minimum wetting angles were observed on white cast iron surfaces roughened with 80 and 800 sand papers which were equal to 42 and 13 degrees, respectively. Wetting angles of electroetched white cast iron surfaces varied between 25 and 31 degrees by varying surface roughness. Maximum and minimum wetting angles on the surface of gray cast iron were obtained in stage one (40 degree) and stage three (25 degree) of electroetching, respectively. Wetting angles on mechanically abraded surfaces of this sample varied between 27 and 31 degrees. Then, the surface roughness factor and the solid fraction in contact with water were calculated using Wenzel equation and Cassie Baxter equation, respectively, and Wenzel and Cassie-Baxter wetting angles of the surfaces were calculated and were compared with their corresponding measured wetting angles. The results indicated that the surface microstructure and the type of constituents present at the surface, surface-roughening method and surface-roughness value influence the cast iron surface wettability, and it is possible to modify metal wetting angle by modification of its structure, surface-roughness method and surface-roughness value. It was also shown that in gray cast iron, the wetting behavior of the electroetched surfaces followed Cassie-Baxter equation in the first and second stages of electroetching and followed Wenzel equation at higher surface roughness (third and fourth stages of electroetching). In all stages of mechanically abrading, the surface of this sample followed Wenzel equation. The wetting behavior of the white cast iron followed Wenzel equation in all electroetching stages. In mechanically abraded conditions, the white cast iron wettability was variable and depended on the surface roughness.

Keywords: Wetting angle, Surface roughness, Microstructure, Gray cast iron, White cast iron, Electroetching, Mechanical abrasion

۱- مقدمه

ترشوندگی یک خصوصیت بسیار مهم سطوح جامد است که بر کاربرد و دیگر خصوصیت‌های سطوح مانند اکسیداسیون، خوردگی، سایش در برابر مایعات، یخ زدگی و آلودگی سطحی تأثیر می‌گذارد [۱]. متداول‌ترین روش بررسی میزان ترشوندگی سطوح، اندازه‌گیری زاویه ترشوندگی^۱ به روش‌هایی نظیر روش قطره بنشسته^۲ است. در این روش‌ها حجم کوچکی از مایع بر روی سطح افقی قرار می‌گیرد و با تصویربرداری دقیق، زاویه تماس آن با سطح جامد اندازه‌گیری می‌شود.

زاویه ترشوندگی در اثر برآیند انرژی‌های سطحی بین فازهای مختلف تعیین می‌شود و می‌تواند بین صفر تا ۱۸۰ درجه تغییر کند. زمانی که زاویه ترشوندگی در گستره صفر تا ۹۰ درجه تغییر کند سطح مورد نظر آب‌دوست و زمانی که بین ۹۰ تا ۱۸۰ درجه تغییر کند، سطح جامد آب‌گریز گفته

می‌شود. سطوح فوق آب‌گریز^۳ سطوحی هستند که زاویه ترشوندگی بالاتر از ۱۵۰ درجه دارند [۱].

سطوح فوق آب‌گریز از پدیده‌های مختلفی مانند برفک زدن، آلودگی و اکسیداسیون جلوگیری می‌نمایند. از این رو در صنایع مختلف بسیار مورد توجه‌اند [۱]. سطوح خارجی که در معرض تغییرات دما و یا دماهای پایین هستند همواره با مشکل ایجاد یخ و شبنم بر روی سطوحشان روبرو هستند. هواپیماها، هواسازها و آنتن‌های ماهواره‌ها از جمله این موارد هستند و ایجاد سطوح فوق آب‌گریز بر روی آن‌ها می‌تواند این مسئله را حل نماید [۲]. یکی دیگر از علت‌های استفاده از سطوح فوق آب‌گریز، ضد باکتری و ضد رطوبت بودن آن‌هاست [۳]. در مورد آلیاژهای فلزی، مانند آلیاژهای منیزیم، پژوهش‌ها نشان داده است که ایجاد سطوح فوق آب‌گریز راه‌حلی مناسب برای کاهش سرعت خوردگی است زیرا سطوح

فوق آب‌گریز از ایجاد لایه الکترولیتی بر روی سطح آلیاژ جلوگیری می‌نمایند [۴]. مطالعات هم‌چنین نشان داده است که این سطوح در محیط‌های آبی خواص ضدسایش بهتری نشان می‌دهند [۵].

زاویه ترشوندگی برای سطوح صاف و همگن ابتدا توسط معادله یانگ^۴، به صورت رابطه ۱ و از براینده انرژی‌های سطحی بین فازهای مختلف، تعریف شد [۶].

$$\cos \theta_y = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (1)$$

در این رابطه θ_y زاویه تماس مایع با سطح جامد، γ_{LV} انرژی فصل مشترک بین مایع و فاز بخار، γ_{SL} انرژی فصل مشترک بین جامد و مایع و γ_{SV} انرژی فصل مشترک بین جامد و بخار است. رابطه ۱ نشان می‌دهد که هر متغیری که بر میزان انرژی سطحی فاز جامد تأثیر گذارد، می‌تواند بر زاویه ترشوندگی مؤثر باشد [۳]. در نتیجه می‌توان استنباط نمود که متغیرهای ریزساختاری شامل نوع فازها، توزیع عناصر و اندازه دانه‌ها بر زاویه ترشوندگی مؤثرند. هم‌چنین اندازه دانه‌ها با توجه به تفاوت انرژی درون دانه‌ها با مرزدانه‌ها می‌تواند بر انرژی سطحی تأثیرگذار باشد. علاوه بر این توزیع عناصر در سطح نیز باعث تغییر در نوع و مقدار فازها، میزان فصل مشترک‌ها در سطح و نهایتاً تغییر انرژی سطحی می‌شود.

سطوح فوق آب‌گریز بر پایه پلیمرها، شیشه‌ها، فلزات، نانو لوله‌های کربن، موم‌ها، نانوسیم‌های سیلیکونی و مواد دیگری مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۷]. در میان مواد مهندسی، فلزات و آلیاژهای آن‌ها نقش عمده‌ای در صنایع مهندسی جدید ایفا می‌نمایند. این مواد به دلیل انرژی فصل مشترک بالای خود به صورت ذاتی آب‌دوست‌اند و ایجاد سطوح فوق آب‌گریز بر روی آن‌ها بسیار مشکل است [۸].

پژوهش‌های مختلف در مورد مواد غیرفلزی، و به مقدار کم تری در مورد مواد فلزی، نشان داده است که زبری سطح و متغیرهای ریزساختاری نیز بر زاویه ترشوندگی تأثیرگذارند [۴]. با توجه به اینکه معادله یانگ فقط در مورد سطوح صاف

صحیح است، دو مدل دیگر برای توضیح اثرات زبری سطحی بر روی آب‌گریزی پیشنهاد شده است.

در صورتی که یک قطره در تماس با سطح بتواند به داخل تمام حفره‌های وشیارهای سطحی نفوذ کند، زبری سطح باعث افزایش سطح تماس می‌شود. ونزل^۵ رابطه ۲ را برای زاویه تماس بر روی چنین سطوح زبری، θ_w ، پیشنهاد کرده است [۶].

$$\cos \theta_w = r_w \cos \theta_y \quad (2)$$

درجایی که θ_w ، زاویه تماس ونزل، r_w متغیر زبری و θ_y زاویه تماس در معادله یانگ است. متغیر زبری، r_w ، توسط رابطه ۳ تعریف می‌شود [۶].

$$r_w = \frac{\text{مساحت سطح تماس واقعی}}{\text{مساحت تصویر سطح تماس}} \quad (3)$$

r_w عددی بزرگ‌تر از ۱ است و با افزایش زبری افزایش می‌یابد. مطالعات نشان داده است که در شرایطی که مایع بتواند به درون تمام شیارها و زبری‌های سطحی نفوذ کند (شرایط رابطه ونزل که عموماً در زبری سطح کم غالب است)، اگر زاویه تماس سطح صاف بیش از ۹۰ درجه باشد، با زبر کردن سطح زاویه تماس افزایش و اگر زاویه تماس سطح صاف کم‌تر از ۹۰ درجه داشته باشد، زاویه تماس بعد از زبر کردن کاهش می‌یابد [۵]. به عبارتی، سطوح به طور ذاتی آب‌دوست با افزایش زبری آب‌دوست‌تر می‌شوند و با کاهش زبری زاویه تماس آن‌ها افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، سطوح آب‌گریز با افزایش زبری آب‌گریزتر و با کاهش زبری آب‌دوست‌تر می‌شوند [۹].

مدل کسی-بکستر^۶ برای شرایطی پیشنهاد شده است که مایع نتواند به داخل حفره‌های سطح نفوذ کند و فقط بر روی ناهمواری‌های سطحی قرار گیرد. کسی و بکستر برای توضیح زاویه تماس بر روی سطوح زبر در این شرایط، θ_{CB} ، رابطه ۴ را پیشنهاد دادند [۱۰].

$$\cos \theta_{CB} = F_s (1 + \cos \theta_w) - 1 \quad (4)$$

درجایی که F_s کسر سطح جامد در تماس با قطره مایع و

θ_w زاویه تماس و نزل است. با توجه به این رابطه می‌توان پیش‌بینی کرد که با افزایش کسر هوای گیر افتاده داخل حفرات سطح زبر، مقدار F_s کاهش و در نتیجه زاویه تماس افزایش می‌یابد.

در حال حاضر راه‌کار ایجاد سطوح فوق آب‌گریز بر مبنای ایجاد سطوح زبر با ساختار سلسله مراتبی^۷ (با دو سایز میکرو و نانو) با انرژی سطحی پایین استوار است [۱۱]. پژوهش‌ها نشان داده است زمانی که سطح دارای زبری با ساختار سلسله مراتبی باشد، F_s به شدت کاهش و در نتیجه آب‌گریزی به شدت افزایش می‌یابد [۱۰].

در سالهای اخیر روش‌های زیادی مانند فرایندهای اسیدی، حکاکی با لیزر^۸، رسوب شیمیایی بخار، روش سل-ژل^۹ و فرایندهای غوطه‌وری در محلول برای ساخت سطوح فوق آب‌گریز بر پایه کاهش انرژی سطحی و یا افزایش زبری سطح توسعه داده شده است [۱۲]. در مورد فلزات، برای زبر کردن سطح از روش‌های سایش مکانیکی، اکسیداسیون آندی، رسوب شیمیایی و الکتروشیمیایی، اچ شیمیایی و جدایش فازی و برای اصلاح شیمیایی سطح از روش‌های پی‌وی دی^{۱۰}، سی‌وی دی^{۱۱} و غوطه‌وری در محلول استفاده شده است [۱۳]. چالش اصلی در این زمینه، ساخت سطوح فوق آب‌گریز پایدار و با استحکام بالا، مناسب برای استفاده در بسیاری از کاربردها مانند سطوح ضد مه^{۱۲} و ضد یخ^{۱۳}، سطوحی با عدم چسبندگی بیومواد، سطوح مقاوم در برابر اکسیداسیون و خوردگی و سطوح مقاوم در برابر سایش در محیط‌های سیالات است [۶].

مانودیس و همکارانش [۱۴] برای ایجاد سطوح فوق آب‌گریز بسیاری از فلزات مانند آلومینیوم با ایجاد سطوح زبر، از اسپری سوسپانسیون نانوذرات سیلیکا در محلول متیل متاکریلیت^{۱۴} و محلول آلکیل سیلوکسان^{۱۵} استفاده نمودند. گیو و همکارانش [۱۵] برای ایجاد سطوح فوق آب‌گریز با ایجاد سطوح زبر، بلوک‌های آلومینیومی و آلیاژهای آن را در محلول 1M NaOH، برای دو ساعت غوطه‌ور نمودند و سپس با سیلان

فلورینه شده^{۱۶} پوشش دادند. ونگ و همکارانش [۱۶] با استفاده از روش پوشش‌دهی سل-ژل و با پوشش‌دهی کره‌های پلی‌استیرنی بر روی ورقه آلومینیوم، یک سطح آلومینیومی فوق آب‌گریز ایجاد کردند.

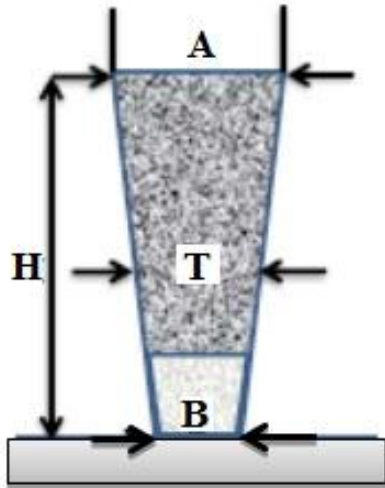
روش رسوب گالوانیکی الکترولس^{۱۷} یک فلز بر روی یک فلز زیر لایه دیگر، به عنوان یک فرایند پایه‌ای برای ساخت سطوح فوق آب‌گریز فلزی مطرح شده است. این روش شامل واکنش‌های گالوانیکی است و زمانی اتفاق می‌افتد که یون‌های فلزی در تماس با زیرلایه ای فلزی با پتانسیل اکسیداسیون کم‌تر (برای مثال Ag^+ با مس) باشند. در این روش کنترل مورفولوژی آسان است و مساحت زیادی را می‌توان تحت عملیات قرار داد ولی در عین حال فرایند زمان‌بر نیست. تائو نینگ و همکارانش [۱۲] از این روش برای پوشش‌دهی سطح فلز روی با پلاتین استفاده نمودند و سطح فوق آب‌گریزی با زاویه تماس ۱۶۰ درجه به‌دست آوردند. البته استفاده از پلاتین در این روش باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود. جعفری و همکارانش [۱۷] از روش اکسیداسیون آندی برای ایجاد نانو ساختارهای متخلخل بر روی آلیاژ آلومینیوم استفاده نمودند و ساختاری شبیه به لانه پرنده ساختند که دارای زاویه ترشوندگی ۱۶۵ درجه بود.

بدیهی است که روش‌های اشاره شده، به سختی می‌توانند تقاضای صنایع را پاسخگو باشند، زیرا در آن‌ها فرایندهای ساخت و تجهیزات پیچیده مورد نیاز است. در بعضی موارد از مواد گران‌قیمتی استفاده شده که هزینه ساخت را بسیار افزایش می‌دهد [۸]، در برخی دیگر پایداری پوشش‌ها کم است یا پوشش‌ها چسبندگی خوبی با زیر لایه فلزی ندارند. با توجه به این مطلب نیاز به توسعه روش‌های ساده‌تر و با خواصی بهتر ضروری است [۱۲].

هدف پژوهش حاضر بررسی ارتباط بین زبری سطح و زاویه ترشوندگی یک چدن خاکستری هیپوپوتکتیک و یک نمونه چدن سفید با ترکیب شیمیایی یکسان است. چدن‌های خاکستری به طور وسیعی در تجهیزات انتقال آب، نظیر

جدول ۱- ترکیب شیمیایی چدن هیپوونکتیک مورد بررسی

عنصر آلیاژی	آهن	کربن	منگنز	سیلیسیم	عناصر دیگر
درصد	بقیه	۲/۵۷	۲/۹۱	۱/۸۲	<۱



شکل ۱- مقطع نمونه ریخته‌گری شده (T ضخامت مقطع در نصف ارتفاع H است)

جدول ۲- ابعاد نمونه ریخته‌گری شده مطابق با استاندارد ASTM A367 روش B شماره 5C

شماره تست تبرییدی	T	A	B	H
ابعاد (میلی‌متر)	۱۹	۲۰/۶	۱۷/۵	۶۳/۵

و یک نمونه چدن سفید برای مطالعه انتخاب شد.

برای ایجاد زبری بر روی سطح نمونه‌ها از دو فرایند مختلف استفاده شد. ابتدا نمونه‌ها در چهار مرحله توسط سنباده‌های ۸۰، ۳۲۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ زبر شدند. در هر یک از این مراحل زاویه ترشوندگی سطوح به‌وسیله یک دستگاه زاویه‌یاب^{۲۱} ساخته شده در دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان و زبری سطوح توسط یک دستگاه زبری‌سنج میتوتویو^{۲۲} مدل اس جی-۲۱۰ (SJ-210) اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها به‌وسیله پودر آلومینای ۰/۳ میکرومتر پولیش و

لوله‌ها و پمپ‌ها استفاده می‌شوند. روش معمول برای جلوگیری از خوردگی این قطعات و کاهش انرژی مورد نیاز برای انتقال آب، پوشش دهی سطوح آن‌ها با ترکیبات پلیمری است. ایجاد سطوح آب‌گریز چدنی بدون استفاده از پوشش‌ها می‌تواند اقدامی مفید در جهت بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌های تولید این تجهیزات باشد و از این نظر دارای اهمیت بالایی است.

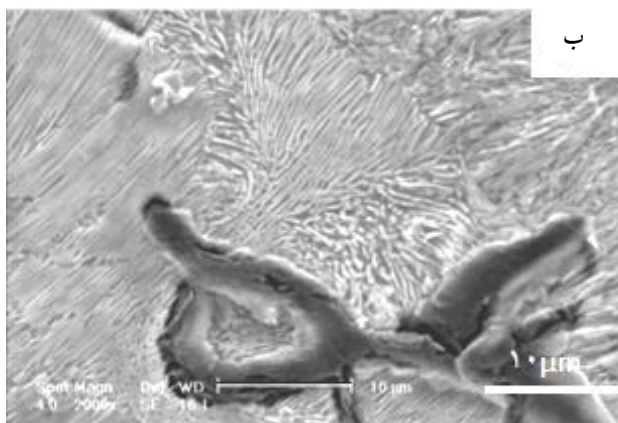
۲- مواد و روش آزمایش

ترکیب شیمیایی چدن مورد بررسی در این مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. آلیاژ در کوره زمینی ذوب و در دمای حدود ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در قالب ساخته شده به روش ماسه CO₂ و منطبق با تست تبرییدی^{۱۸} استاندارد ASTM A367 روش B، ریخته‌گری شد. در این روش، مقطع ریخته‌گری شده دوزنقه‌ای شکل است (شکل ۱) ولی بر اساس استاندارد می‌تواند ابعاد مختلفی داشته باشد که در این پژوهش از ابعاد آزمون تبرییدی شماره 5C، که در جدول ۲ ارائه شده است، استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود برای رسیدن به تنوع ساختاری در قطعه ریختگی، مبرد فولادی به ضخامت ۲۵ میلی‌متر در زیر حفره قالب تعبیه شد. با توجه به تفاوت سرعت سرد شدن در مقاطع مختلف نمونه ریختگی، در قسمت پایین قطعه ساختار چدن سفید و خال‌دار و در مقاطع بالاتر انواعی از توزیع گرافیت‌های لایه‌ای به‌دست آمد که در این مقاله نتایج مربوط به ساختار کاملاً سفید و ساختار کاملاً خاکستری با توزیع گرافیت‌های لایه‌ای نوع A ارائه خواهد شد.

نمونه پس از سرد شدن در مقاطع عرضی برش زده شد. مقاطع برش خورده توسط سنباده‌های شماره ۸۰ تا ۱۲۰۰ و سپس به‌وسیله پودر آلومینای ۰/۳ میکرومتر آماده‌سازی و به‌وسیله میکروسکوپ نوری مدل نیکون اپیفوت ۱۹۳۰ و میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۲۰} مدل Philips 130XL مطالعه شدند. به این روش، یک نمونه با توزیع گرافیت لایه‌ای نوع A



الف



ب

شکل ۲- ریزساختار نمونه چدن خاکستری با توزیع گرافیت A پس از الکترواچ: الف) میکروسکوپ نوری و ب) SEM

مقادیر زاویه ترشوندگی بر روی سطح نمونه چدن سفید و به ترتیب در مراحل سنباده‌زنی با سنباده ۸۰ و ۸۰۰ و برابر با ۴۲ و ۱۳ درجه به دست آمده است. در مورد سطوح الکترواچ شده نمونه چدن سفید، با تغییر زبری سطح زاویه ترشوندگی بین ۲۵ تا ۳۱ درجه تغییر می‌کند. هم‌چنین بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر زاویه ترشوندگی بر روی سطوح نمونه چدن خاکستری با توزیع گرافیت A، به ترتیب در مرحله اول الکترواچ (۴۰ درجه) و در مرحله سوم الکترواچ (۲۵ درجه) به دست آمده است. زاویه‌های ترشوندگی سطوح سنباده‌زنی شده این نمونه بین ۲۷ تا ۳۱ درجه متغیر است. علاوه بر این با بررسی این جدول‌ها می‌توان مشاهده نمود که دو سطح با فازهای مختلف که به روش یکسانی زبر شده و دارای زبری سطح یکسانی هم هستند، زاویه ترشوندگی سطوح‌شان با

زاویه ترشوندگی و زبری آن‌ها اندازه‌گیری شد. در ادامه نمونه‌های پولیش شده طی چهار مرحله توسط محلولی شامل ۹۶٪ اسید استیک و ۴٪ اسید پرکلریک الکترواچ^{۲۳} شدند. الکترواچ با ولتاژ ۲۰ ولت و با استفاده از نیکل به‌عنوان کاتد انجام شد. سپس زاویه ترشوندگی و زبری نمونه‌های الکترواچ شده در هر چهار مرحله اندازه‌گیری شد.

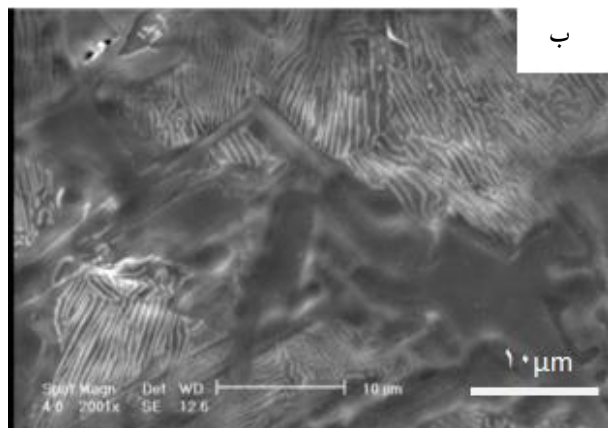
قبل از اندازه‌گیری زاویه ترشوندگی نمونه‌ها برای تمیزکاری سطح به مدت ۲۰ دقیقه درون اتانول^{۲۴} صنعتی ۹۶٪ در دستگاه آلتراسونیک^{۲۵} وایز کیلین^{۲۶} مدل WUC-D10H قرار گرفتند و سپس با اتانول آب‌کشی و سریع خشک شدند. در تمام آزمون‌ها از آب مقطر یک بار تقطیر استفاده شد و حجم قطره در تمام آزمون‌ها ۲ میکرولیتر بود که توسط یک نازل Dragon Lab Step Mate مدل JV62782 روی سطح نمونه‌ها گذاشته شد.

۳- نتایج و بحث

شکل ۲ تصاویر میکروسکوپی نوری و الکترونی روبشی مربوط به نمونه چدن خاکستری الکترواچ شده و شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی نوری و الکترونی روبشی مربوط به چدن سفید الکترواچ شده را نشان می‌دهد. بر اساس استاندارد ASTM A247، گرافیت‌های لایه‌ای در شکل ۲، دارای توزیع A هستند که در زمینه‌ای از فاز پرلیت و مقدار کمی فاز فریت پراکنده شده‌اند. هم‌چنین فازهای تشکیل‌دهنده ساختار در نمونه چدن سفید (شکل ۳) شامل پرلیت و سمیتیت هستند.

شکل ۴ نمونه‌ای از تصاویر قطرات آب و زاویه ترشوندگی اندازه‌گیری شده را بر روی این دو نمونه نشان می‌دهد. زاویه ترشوندگی و زبری متوسط (R_a) اندازه‌گیری شده نمونه‌های سنباده زده شده و الکترواچ شده برای نمونه‌های چدن خاکستری با توزیع گرافیت A و چدن سفید در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است. همان‌گونه که نتایج ارائه شده در این جدول‌ها نشان می‌دهد، بیشترین و کمترین

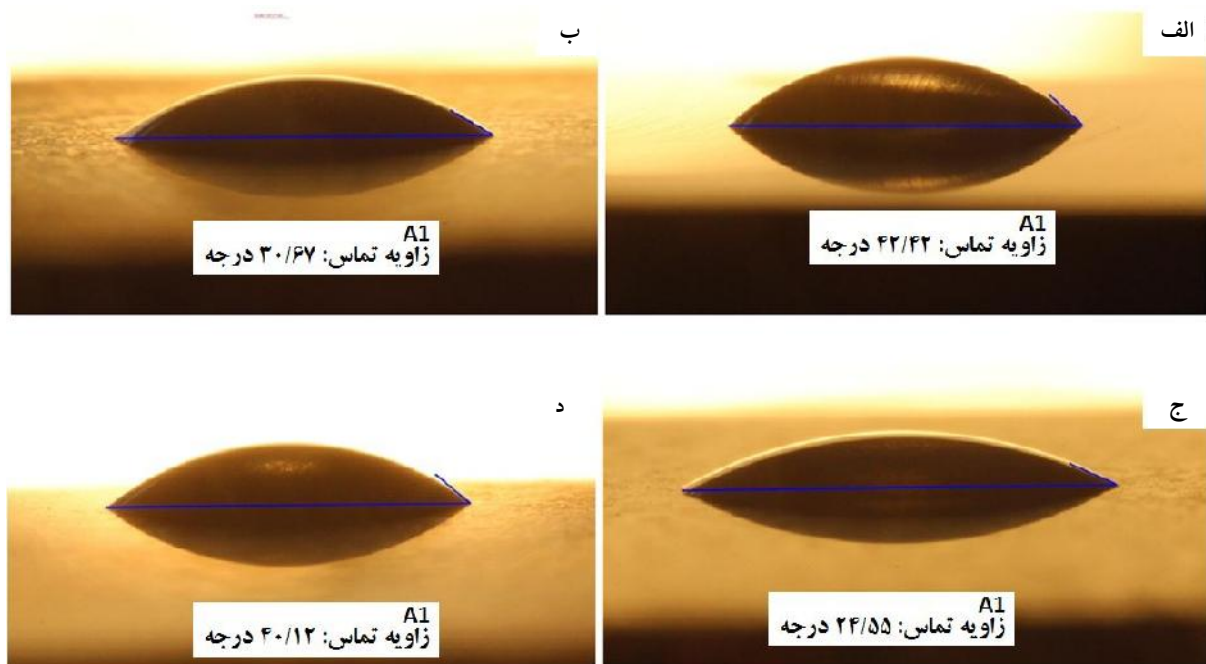
فازهای آن‌ها و علاوه بر آن متفاوت بودن شکل فازها و در نتیجه توپوگرافی سطح است (شکل‌های ۲ و ۳). افزون بر این، نتایج این جدول‌ها نشان‌دهنده تفاوت در زاویه ترشوندگی سطوحی است که دارای فازها و زبری یکسان و روش زبری متفاوت هستند. نمونه این رفتار، چدن سفید زبر شده در مرحله اول الکترواچ و زبر شده با سنباده ۸۰۰ و یا چدن سفید زبر شده در مرحله چهارم الکترواچ و زبر شده با سنباده ۸۰ هستند. در پژوهش دیگری که زبر کردن سطح توسط سنباده‌زنی و الکترواچ بر روی نمونه‌های فولادی انجام شده نیز، نتایج نشان‌دهنده تفاوت زاویه ترشوندگی سطوح دارای زبری سطح یکسان است که به روش‌های مختلف زبر شده‌اند [۱۸]. علت این پدیده تفاوت در توپوگرافی سطوح زبر شده به روش‌های مختلف بیان شده است. در روش سنباده‌زنی، فازها شکل اولیه خود را از دست می‌دهند. در حالی که در روش الکترواچ، توپوگرافی سطح با توجه به خوردگی انتخابی فازها و عناصر سطحی بر اساس نوع و شکل فازها، تعیین می‌شود [۱۸]. زمانی که توپوگرافی سطح تغییر می‌کند میزان تأثیر انرژی سطحی و ارتفاع و پهنای قله‌ها و دره‌ها بر زاویه ترشوندگی تغییر کرده، هر دو پدیده به طور هم‌زمان بر زاویه تماس تأثیر می‌گذارند. در واقع با زبر کردن سطح، فازهای در تماس با قطره آب تغییر می‌کند و در نتیجه انرژی سطحی مؤثر تغییر می‌نماید. علاوه بر این، توپوگرافی و ابعاد زبری سطح (قله‌ها و دره‌ها) بر نحوه قرارگرفتن قطره آب نیز موثرند و همه این عوامل به صورت هم‌زمان بر زاویه ترشوندگی تأثیرگذارند [۱۹، ۲۰]. با بررسی سطوح یک نمونه با فازهای یکسان که به روش یکسان زبر شده است ولی دارای زبری سطح متفاوت هستند (جدول ۳ و ۴) می‌توان مشاهده نمود با تغییر زبری سطح، که به علت تفاوت در ارتفاع قله‌ها و دره‌هاست، زاویه ترشوندگی نیز تغییر می‌کند. پژوهش‌های دیگری که بر روی نمونه‌های فولادی، برنجی و آلومینیومی زبر شده با سنباده انجام شده است نیز تفاوت زاویه ترشوندگی سطوح متفاوت



شکل ۳- ریزساختار نمونه چدن سفید پس از الکترواچ:

الف) میکروسکوپ نوری و ب) SEM

یکدیگر متفاوت است. برای مثال زاویه ترشوندگی سطح نمونه چدن خاکستری که در مرحله اول الکترواچ زبر شده است و دارای زبری سطح ۰/۲۹۰ میکرومترست برابر با ۴۰ درجه است. در حالی که زاویه ترشوندگی نمونه چدن سفید با زبری تقریباً مشابه (۰/۳۱۰ میکرومتر) که در مرحله سوم الکترواچ زبر شده است، برابر با ۲۵ درجه است. هم‌چنین در مورد نمونه‌های چدن خاکستری و چدن سفید که به ترتیب با سنباده‌های ۱۲۰۰ و ۸۰۰ زبر شده و دارای زبری سطح تقریباً مشابه (به ترتیب ۰/۰۶۲ و ۰/۰۶۶ میکرومتر) هستند، زاویه ترشوندگی متفاوت و به ترتیب برابر با ۳۰ و ۴۲ درجه است. به نظر می‌رسد علت این مسئله تفاوت در انرژی سطحی نمونه‌ها به علت تفاوت در نوع



شکل ۴- نمونه‌ای از تصاویر قطرات آب و زاویه ترشوندگی اندازه‌گیری شده برای سطوح زیر شده: الف) نمونه چدن سفید زیر شده با سنباده ۸۰۰، ب) نمونه چدن خاکستری با توزیع گرافیت A زیر شده با سنباده ۸۰۰، ج) نمونه چدن سفید زیر شده در مرحله سوم الکترواچ و د) نمونه چدن خاکستری با توزیع گرافیت A زیر شده در مرحله اول الکترواچ

جدول ۳- زاویه ترشوندگی و زبری متوسط (R_a) اندازه‌گیری شده برای نمونه چدن خاکستری الکترواچ شده و سنباده زده شده

مرحله زبرشدن	زاویه ترشوندگی (درجه)	زبری (R_a میکرومتر)
مرحله ۱ الکترواچ	40 ± 1	0.290 ± 0.012
مرحله ۲ الکترواچ	39 ± 2	0.440 ± 0.010
مرحله ۳ الکترواچ	25 ± 3	1.200 ± 0.011
مرحله ۴ الکترواچ	27 ± 3	0.680 ± 0.008
سنباده ۸۰	30 ± 4	1.033 ± 0.013
سنباده ۳۲۰	27 ± 2	0.168 ± 0.011
سنباده ۸۰۰	31 ± 2	0.075 ± 0.009
سنباده ۱۲۰۰	30 ± 2	0.062 ± 0.007

قله‌ها و دره‌ها تغییر نموده، در نتیجه سطح تماس آب تغییر می‌کند [۱۹، ۲۰]. افزون بر این، تغییر در ابعاد پستی و بلندی‌های سطحی ممکن است شرایطی را ایجاد نماید که منجر به حبس هوا در بین زبری‌های سطحی شده، در نهایت

از نظر زبری را نشان می‌دهند [۱۹، ۲۰]. در این پژوهش‌ها علت این مسئله این‌گونه بیان شده که در اثر زیر کردن سطح، فازهای در تماس با قطره آب تغییر کرده، انرژی سطحی موثر تغییر می‌نماید. همچنین در مقادیر زبری متفاوت، ارتفاع

جدول ۴- زاویه ترشوندگی و زبری متوسط (R_a) اندازه گیری شده برای نمونه چدن سفید الکترواچ شده و سنباده زده شده

مرحله زبرشدن	زاویه ترشوندگی (درجه)	زبری (میکرومتر) R_a
مرحله ۱ الکترواچ	30 ± 3	0.070 ± 0.004
مرحله ۲ الکترواچ	29 ± 2	0.130 ± 0.010
مرحله ۳ الکترواچ	25 ± 2	0.310 ± 0.009
مرحله ۴ الکترواچ	31 ± 1	0.370 ± 0.006
سنباده ۸۰	13 ± 2	0.375 ± 0.005
سنباده ۳۲۰	40 ± 2	0.095 ± 0.006
سنباده ۸۰۰	42 ± 3	0.066 ± 0.004
سنباده ۱۲۰۰	25 ± 1	0.050 ± 0.004

در شکل ۵ نشان داده شده است. برای هر نمونه در هر مرحله زبرکردن (سنباده زنی و الکترواچ)، با استفاده از این نمودارها و با استفاده از رابطه ۵، فاکتور زبری در رابطه و نزل، r_w ، محاسبه و سپس با استفاده از رابطه و نزل (رابطه ۲) زاویه ترشوندگی و نزل، θ_w ، تعیین شد.

$$r_w = \frac{\text{طول نمودار زبری سنجی}}{\text{طول محور } x} \quad (5)$$

نتایج به دست آمده از روابط ۲ و ۵ در جدول ۶ نشان داده شده است. نمودارهای نشان داده شده در شکل های ۶- الف و ۶- ب نشان دهنده تغییرات r_w در مراحل الکترواچ و زبر شدن با سنباده بر حسب R_a برای نمونه های چدن خاکستری با توزیع گرافیت A و چدن سفید است.

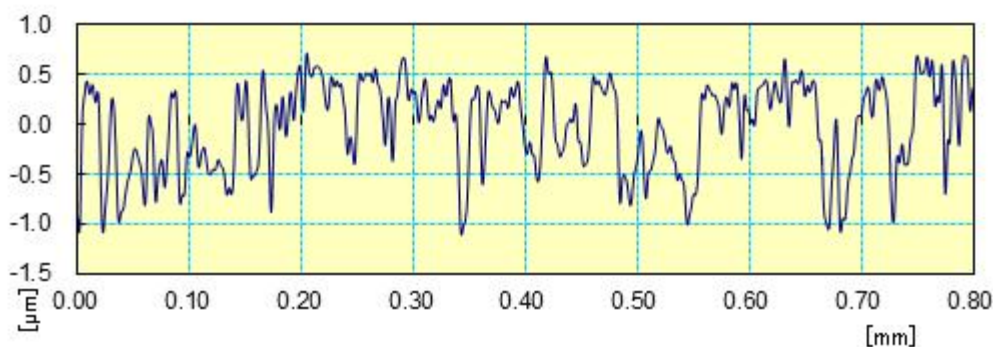
همان گونه که در شکل های ۶- الف و ب می توان مشاهده نمود، در نمونه های چدن خاکستری با توزیع گرافیت A و چدن سفید همواره در مراحل مختلف الکترواچ و سنباده زنی، با افزایش R_a مقدار r_w نیز افزایش می یابد. این مسئله نشان دهنده یکسان بودن روند افزایشی این دو متغیر مربوط به زبری سطح است.

برای تخمین کسر جامد در تماس با قطره آب در رابطه کسی-بکستر، F_s ، پستی و بلندی های روی سطح زبر شده

زاویه ترشوندگی را تغییر دهد. در اصل تغییر هندسه سطح (ارتفاع و پهنای پستی و بلندی ها) بر زاویه تماس تأثیرگذار است [۲۱].

برای تعیین زوایای ترشوندگی بر اساس مدل های و نزل و کسی-بکستر نیاز به زاویه تماس یانگ (رابطه ۱)، فاکتور زبری در رابطه و نزل (رابطه ۲) و کسر جامد در تماس با قطره آب در رابطه کسی-بکستر (رابطه ۴) است. باید توجه نمود که رابطه یانگ برای سطح صاف تک فاز نوشته شده است. از این رو محاسبه زاویه تماس یانگ با استفاده از رابطه ۱ برای سطوح پیچیده ای که در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است، به راحتی امکان پذیر نیست. با این حال برخی پژوهشگران از زاویه مشاهده شده بر روی سطح پولیش شده و صیقلی به این منظور استفاده کرده اند [۱۰، ۱۹، ۲۱]. در این پژوهش نیز سطح پولیش شده هر نمونه به عنوان سطح صاف ایده آل در نظر گرفته و زاویه تماس اندازه گیری شده بر روی آن برابر با زاویه تماس یانگ فرض شد. زوایای ترشوندگی سطح صاف در نظر گرفته شده برای دو نمونه چدن مورد بررسی در جدول ۵ نشان داده شده است.

نمونه ای از نمودارهای به دست آمده از آزمون زبری سنجی



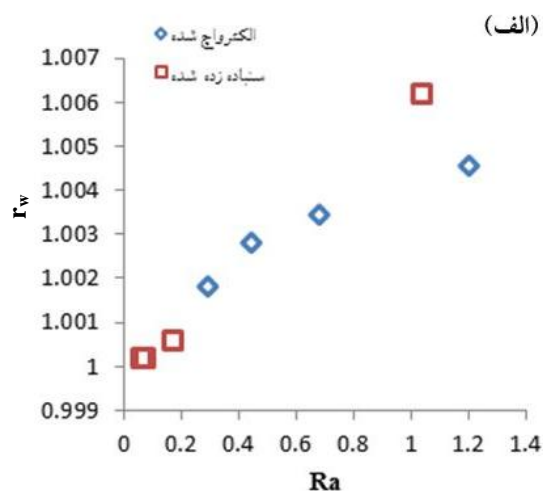
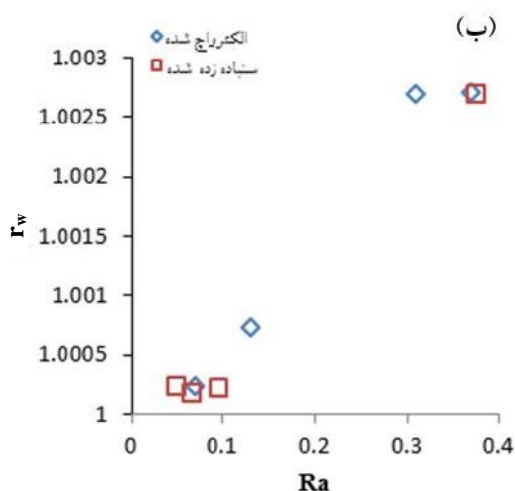
شکل ۵- نمونه‌ای از نمودارهای زبری سنجی مربوط به مرحله ۴ الکترواچ نمونه چدن سفید

جدول ۵- زاویه‌های ترشوندگی سطح صاف در نظر گرفته شده برای نمونه‌های چدنی

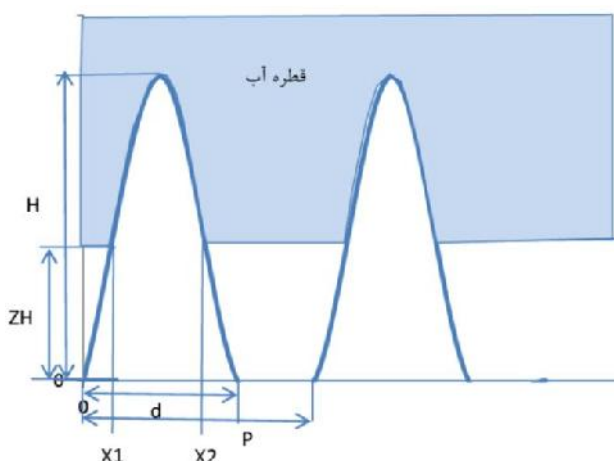
نمونه	زاویه ترشوندگی (درجه)
چدن خاکستری با توزیع گرافیت A	۲۹
چدن سفید	۳۰

جدول ۶- فاکتور زبری رابطه وزنل، r_w ، و زاویه ترشوندگی وزنل، θ_w ، برای نمونه چدن خاکستری با توزیع گرافیت A و چدن سفید

نمونه	مراحل زبر شدن	r_w	$\cos\theta_w$	θ_w
چدن خاکستری با توزیع گرافیت A	مرحله ۱ الکترواچ	۱/۰۰۱۸۲	۰/۸۷۲	۳۰
	مرحله ۲ الکترواچ	۱/۰۰۲۸۱	۰/۸۷۲	۳۰
	مرحله ۳ الکترواچ	۱/۰۰۴۵۵	۰/۸۷۴	۲۹
	مرحله ۴ الکترواچ	۱/۰۰۳۴۴	۰/۸۷۳	۲۹
	سنباده ۸۰	۱/۰۰۶۲۰	۰/۸۷۵	۲۹
	سنباده ۳۲۰	۱/۰۰۰۵۷	۰/۸۷۰	۳۰
	سنباده ۸۰۰	۱/۰۰۰۱۹	۰/۸۷۴	۳۰
	سنباده ۱۲۰۰	۱/۰۰۰۱۹	۰/۸۷۳	۳۰
چدن سفید	مرحله ۱ الکترواچ	۱/۰۰۰۲۳۲	۰/۸۷	۳۰
	مرحله ۲ الکترواچ	۱/۰۰۰۷۱۸	۰/۸۷	۳۰
	مرحله ۳ الکترواچ	۱/۰۰۲۶۹۱	۰/۸۷	۳۰
	مرحله ۴ الکترواچ	۱/۰۰۲۷۰۷	۰/۸۷	۳۰
	سنباده ۸۰	۱/۰۰۲۶۸۶	۰/۸۷	۳۰
	سنباده ۳۲۰	۱/۰۰۰۲۱	۰/۸۷	۳۰
	سنباده ۸۰۰	۱/۰۰۰۱۶۹	۰/۸۷	۳۰
	سنباده ۱۲۰۰	۱/۰۰۰۲۲۲	۰/۸۷	۳۰



شکل ۶- تغییرات r_w بر حسب R_a در مراحل الکترواچ و زبر شدن با سنباده برای: الف) نمونه چدن خاکستری و ب) نمونه چدن سفید



شکل ۷- مدل ساده شده سطوح نمونه‌ها ونحوه تماس آن‌ها با قطره آب در مدل کسی-بکستر

انجام شد و مشخص شد که در مقادیر Z بیش‌تر از ۰/۱ هیچ یک از زوایای ترشوندگی بر مدل کسی-بکستر مطابقت نمی‌کنند. این پدیده نشان‌دهنده این است که در مورد نمونه‌های مورد بحث اگر قرار باشد سطح از رابطه کسی-بکستر پیروی کند، حجم کمی از هوا می‌تواند بین حفره‌های سطح جامد و آب محبوس شود. این مسئله باعث کاهش زاویه ترشوندگی در مورد سطوح پیروی‌کننده از مدل کسی-بکستر می‌گردد.

$$F_s = \frac{\text{طول منحنی از } X1 \text{ تا } X2}{\text{طول منحنی از } X1 \text{ تا } X2 - (X2 - X1) + X2} \quad (8)$$

به صورت نشان داده شده در شکل ۷ ساده‌سازی شد که در آن H و P به ترتیب مقادیر متوسط ارتفاع و فاصله برآمدگی‌ها، d عرض متوسط برآمدگی در محل تماس با قطره آب، Z کسر ارتفاع متوسط خیس نشده برآمدگی‌ها و $X1$ و $X2$ فاصله مرز سه فازی جامد-مایع-هوا در دو طرف برآمدگی از ابتدای آن است.

سپس با توجه به نمودارهای زبری‌سنجی و با استفاده از نرم افزار Microsoft Excel 2010، مقدار متوسط H ، P و d مربوط به هر نمونه در هر مرحله زبرکردن توسط سنباده‌زنی و الکترواچ به دست آمده و معادله منحنی بر حسب H و d (رابطه ۶) و مقادیر $X1$ و $X2$ بر حسب d و Z تعیین شد (رابطه ۷).

$$y = \frac{-4H}{d^2} X^2 + \frac{-4H}{d} X \quad (6)$$

$$X1, X2 = \frac{d(1 \pm \sqrt{1-Z})}{2} \quad (7)$$

در ادامه کسر جامد در تماس با قطره آب با استفاده از رابطه ۸ و زاویه ترشوندگی کسی-بکستر، θ_{cb} ، با استفاده از رابطه ۴ برای نمونه‌ها در هر مرحله محاسبه شد. نتایج به دست آمده برای نمونه‌های چدن خاکستری و چدن سفید به ترتیب در جدول ۷ ارائه شده است. در این محاسبات Z برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شد. در واقع، در ابتدا محاسبات برای مقادیر Z مختلف

جدول ۷- F_s ، θ_{cb} ، $\cos\theta_{cb}$ ، برای نمونه چدن خاکستری با توزیع گرافیت A و چدن سفید در $Z=0/1$

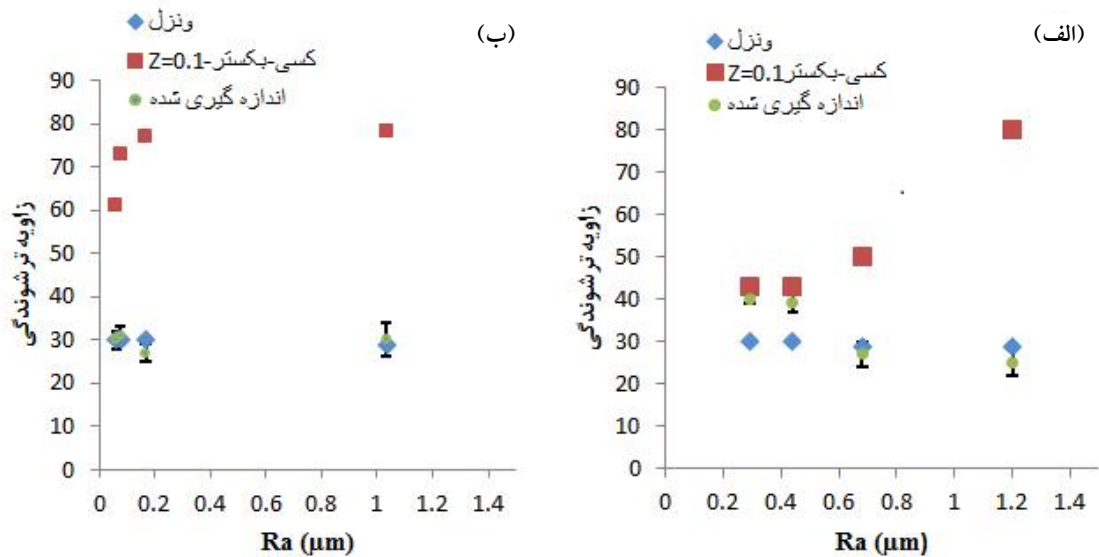
نمونه	مراحل زبر شدن	F_s	$\cos\theta_w$	θ_{cb}
چدن خاکستری با توزیع گرافیت A	مرحله ۱ الکترواچ	۰/۹۲	۰/۷۲۵	۴۳
	مرحله ۲ الکترواچ	۰/۹۲	۰/۷۲۸	۴۳
	مرحله ۳ الکترواچ	۰/۶۲	۰/۱۶۲	۸۰
	مرحله ۴ الکترواچ	۰/۸۸	۰/۶۴۵	۵۰
	سنباده ۸۰	۰/۶۴	۰/۲۰۴	۷۸
	سنباده ۳۲۰	۰/۶۵	۰/۲۲۴	۷۷
	سنباده ۸۰۰	۰/۶۸	۰/۲۸۱	۷۳
	سنباده ۱۲۰۰	۰/۷۹	۰/۴۹	۶۱
چدن سفید	مرحله ۱ الکترواچ	۰/۸۹	۰/۶۶	۴۸
	مرحله ۲ الکترواچ	۰/۸۵	۰/۵۹	۵۴
	مرحله ۳ الکترواچ	۰/۸۰	۰/۴۹	۶۱
	مرحله ۴ الکترواچ	۰/۷۵	۰/۴۱	۶۴
	سنباده ۸۰	۰/۸۶	۰/۶۱	۵۲
	سنباده ۳۲۰	۰/۸۹	۰/۶۷	۴۸
	سنباده ۸۰۰	۰/۹۱	۰/۷۱	۴۵
	سنباده ۱۲۰۰	۰/۹۲	۰/۷۲	۴۴

مراحل اول و دوم الکترواچ که دارای زبری سطح کم تری نسبت به مراحل بعدی است، از رابطه کسی-بکستر پیروی می نماید و با افزایش زبری سطح در مراحل سوم و چهارم الکترواچ، رفتار سطوح زبر از رابطه کسی-بکستر به ونزل تغییر می یابد. با بررسی شکل ۸- ب نیز می توان مشاهده نمود که سطح نمونه چدن خاکستری با توزیع گرافیت A در همه مراحل زبر شدن با سنباده از رابطه ونزل تبعیت می کند.

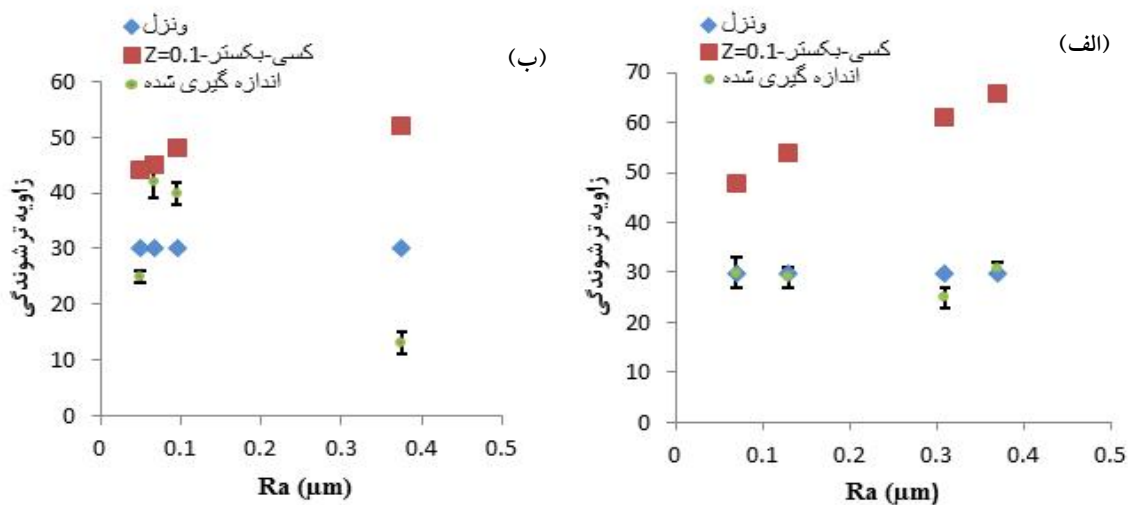
نمودار شکل ۹- الف نشان دهنده پیروی نمونه چدن سفید از رابطه ونزل در همه مراحل الکترواچ است. هم چنین با بررسی شکل ۹- ب می توان مشاهده نمود که رفتار نمونه چدن سفید در مراحل زبر شدن با سنباده های ۸۰ و ۳۲۰ بر هیچ یک

نمودارهای مربوط به تغییر زوایای ترشوندگی اندازه گیری شده، کسی-بکستر و ونزل بر حسب R_a برای مراحل مختلف زبر شدن با سنباده و الکترواچ در شکل ۸ و ۹ رسم شده است. بررسی های پژوهشگران دیگری که در زمینه تطبیق مدل های ترشوندگی سطوح با نتایج تجربی فعالیت دارند نشان می دهد که در این پژوهش ها اختلاف های در حد ۳ الی ۷ درجه قابل چشم پوشی دانسته می شود [۱۹، ۲۰، ۲۲]. بر این اساس در این پژوهش نیز عدم تطابق های کم تر از این رنج قابل اغماض فرض شده اند.

با توجه به شکل ۸- الف می توان مشاهده نمود که رفتار خیس شوندگی نمونه چدن خاکستری با توزیع گرافیت A در



شکل ۸- تغییرات زاویه ترشوندگی اندازه گیری شده، کسی-بکستر و ونزل بر حسب R_a مربوط به نمونه چدن خاکستری در مراحل مختلف: الف) الکترواچ و ب) زبر شدن با سنباده



شکل ۹- نمودار تغییرات زاویه ترشوندگی اندازه گیری شده، کسی-بکستر و ونزل بر حسب R_a مربوط به نمونه چدن سفید در مراحل مختلف: الف) الکترواچ و ب) زبر شدن با سنباده

علاوه بر مقدار عدد زبری، روش زبر کردن سطح و نوع ساختار و فازهای موجود در سطح چدن نیز بر رفتار ترشوندگی آن تأثیر می‌گذارد. نتایج ارائه شده، نتایج اولیه پژوهش گسترده‌تری است که تأثیر تغییر نوع، درصد و اندازه فازها در ساختار چدن‌ها را در کنار زبری سطح بر رفتار ترشوندگی سطح چدن

از روابط ونزل و کسی-بکستر مطابقت نمی‌نماید. در مورد سطح زبر شده با سنباده 80° نمونه چدن سفید از رابطه کسی-بکستر و در مورد سطح زبر شده با سنباده 120° از رابطه ونزل پیروی می‌کند. همان‌گونه که از نتایج ارائه شده در این مقاله دیده می‌شود،

مورد مطالعه قرار می‌دهد. هرچند در هیچ‌یک از شرایط اعمال شده در این پژوهش، سطح آلیاژ مورد مطالعه خصوصیت آب‌گریزی (زاویه ترشوندگی بیش از ۹۰ درجه) پیدا نکرد، ولی به نظر می‌رسد رسیدن به این مهم در ادامه پژوهش ممکن باشد. تعیین مدل رفتار ترشوندگی و عوامل موثر بر آن ابزاری به‌دست می‌دهد که به‌وسیله آن و با تنظیم ویژگی‌های ساختاری و زبری و روش زبر کردن بتوان به خصوصیت‌های موردنیاز هر کاربرد مشخص نزدیک شد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ریزساختار و نوع فازهای سطحی بر ترشوندگی سطوح چدن‌ها تأثیرگذار است و امکان تغییر زاویه ترشوندگی فلزات با اصلاح ساختار فازی آن‌ها وجود دارد.

۲- بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار زاویه ترشوندگی به‌دست آمده بر روی سطح نمونه چدن سفید، و به‌ترتیب در مراحل سنباذه‌زنی با سنباذه ۸۰ و ۸۰۰ و برابر با ۴۲ و ۱۳ درجه مشاهده شد. در مورد سطوح الکترواچ شده، زوایای ترشوندگی نمونه چدن سفید با تغییر زبری سطح بین ۲۵ تا ۳۱ درجه تغییر کرد.

۳- بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار زاویه ترشوندگی بر روی سطوح

نمونه چدن خاکستری با توزیع گرافیت A به‌ترتیب در مرحله اول الکترواچ (۴۰ درجه) و مرحله سوم الکترواچ (۲۵ درجه) به‌دست آمد. زوایای ترشوندگی سطوح سنباذه‌زده شده این نمونه بین ۲۷ تا ۳۱ درجه بود.

۴- ترشوندگی سطح نمونه چدن خاکستری با توزیع گرافیت A در مراحل اول و دوم الکترواچ (زبری سطح کم‌تر) از رابطه کسی-بکستر و در مراحل سوم و چهارم الکترواچ (با افزایش زبری سطح) از رابطه ونزل تبعیت کرد. ترشوندگی سطح این چدن در همه مراحل زبر شدن با سنباذه تابع رابطه ونزل بود.

۵- ترشوندگی سطح نمونه چدن سفید در همه مراحل الکترواچ از رابطه ونزل تبعیت کرد. ترشوندگی سطح این نمونه در مراحل زبر شدن با سنباذه‌های ۸۰ و ۳۲۰ بر هیچ‌یک از روابط ونزل و کسی-بکستر منطبق نبود. در مورد سطح زبر شده با سنباذه ۸۰۰ نمونه چدن سفید از رابطه کسی-بکستر و در مورد سطح زبر شده با سنباذه ۱۲۰۰ از رابطه ونزل پیروی نمود.

۶- مشخص شد که روش زبر کردن سطح نیز بر رفتار ترشوندگی چدن‌ها مؤثر است و امکان تغییر زاویه ترشوندگی با تغییر روش زبر کردن وجود دارد.

واژه‌نامه

1. wetting angle	10. PVD	19. Nikon Epiphot 300
2. sessile drop	11. CVD	20. SEM
3. super-hydrophobic	12. anti-fogging	21. goniometer
4. Young	13. anti-icing	22. Mitutoyo
5. Wenzel	14. Methyl Methacrylate	23. Electroetch
6. Cassie-Baxter	15. Alkyl Siloxane	24. Ethanol
7. hierarchical	16. Fluorinated Silane	25. ultrasonic
8. laser etching	17. electroless galvanic deposition	26. Wise clean
9. sol-gel	18. chill Test	

مراجع

- Feng, L., Li, S., Li, Y., Li, H., Zhang, L. and Zhai, J., "Super-Hydrophobic Surfaces, from Natural to Artificial", *Advanced Materials*, Vol. 14, pp. 1857-1860, 2002.
- Celia, E., Darmanin, T., Givenchy, E., Amigoni, S. and Guittard, F., "Recent Advances in Designing

- Super-Hydrophobic Surfaces”, *Colloid and Interface Science*, Vol. 402, pp. 1–18, 2013.
3. Peng, C.W., Chang, K.C., Weng, C.G., Lai, M.C., Hsu, C.H., Hsu, S.C. and Hsu, Y.Y., “Nano-Casting Technique to Prepare Polyaniline Surface with Biomimetic Super-Hydrophobic Structures for Anticorrosion Application”, *Electrochimica Acta*, Vol. 95, pp. 192-199, 2012.
 4. Gupta, A., Sasikala, S., Mahadik, D.B., Rao, A.V. and Barshilia H.C., “Dual-Scale Rough Multifunctional Super-Hydrophobic ITO Coatings Prepared by Air Annealing of Sputtered Indium–Tin Alloy Thin Films”, *Applied Surface Science*, Vol. 258, pp. 9723-9731, 2012.
 5. Wang, Z., Li, Q., She, Z., Chen, F., Li, F., Zhang, X. and Zhang, P., “Facile and Fast Fabrication of Super-Hydrophobic Surface on Magnesium Alloy”, *Applied Surface Science*, Vol. 271, pp. 182-192, 2013.
 6. Shi, X., Lu, S. and Xu, W., “Fabrication of CuZn₅-ZnO-CuO Micro-Nano Binary Super-Hydrophobic Surfaces of Cassie-Baxter and Gecko Model on Zinc Substrates”, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 134, pp. 657-663, 2013.
 7. Ma, M. and Hill, R.M., “Super-Hydrophobic Surfaces”, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, Vol.11, pp. 193–202, 2006.
 8. Xie, D. and Li, W., “A Novel Simple Approach to Preparation of Super-Hydrophobic Surfaces of Aluminum Alloys”, *Applied Surface Science*, Vol. 258, pp. 1004–1007, 2011.
 9. Min, T., “Design and Fabrication of Super-Hydrophobic Surfaces by Laser Micro/Nano Processing”, Ph.D. Thesis, National University of Singapore, 2012.
 10. Wua, B., Zhou, M., Li, J., Ye, X., Li, G. and Cai, L., “Superhydrophobic Surfaces Fabricated by Microstructuring of Stainless Steel using a Femtosecond Laser”, *Applied surface science*, Vol. 256, pp. 61–66, 2009.
 11. Yan, Y., Ga, N. and Barthlott, W., “Mimicking Natural Super-Hydrophobic Surfaces and Grasping the Wetting Process: A Review on Recent Progress in Preparing Super-Hydrophobic Surfaces”, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 169, pp. 80-105, 2013.
 12. Ning, T., Xu, W. and Lu, S., “One-Step Controllable Fabrication of Super-Hydrophobic Surfaces with Special Composite Structure on Zinc Substrates”, *Colloid and Interface Science*, Vol. 361, pp. 388-396, 2011.
 13. Roach, P., Shirtcliffe, N.J. and Newton, M.I., “Progress in Super-Hydrophobic Surface Development”, *Soft Matter*, Vol. 4, pp. 224–240, 2008.
 14. Manoudis, P.N., Karapanagiotis, I., Tsakalof, A., Zuburtikudis, I. and Panayiotou, C., “Superhydrophobic Composite Films Produced on Various Substrates”, *Langmuir*, Vol.24, pp. 11225-11232, 2008.
 15. Guo, Z.G., Zhou, F., Hao, J.C. and Liu, W.M., “Stable Biomimetic Super-Hydrophobic Engineering Materials”, *American Chemical Society*, Vol. 127, pp. 15670–15671, 2005.
 16. Wang, Q., Zhang, B.W., Qu, M.N., Zhang, J.Y. and He, D.I., “Fabrication of Superhydrophobic Surfaces on Engineering Material Surfaces with Stearic Acid”, *Applied Surface Science*, Vol.254, pp. 2009–2012, 2008.
 17. Jafari, R., Menini, R. and Farzaneh, M., “Super-Hydrophobic and Ice-Phobic Surfaces Prepared by RF-Sputtered Polytetrafluoroethylene Coatings”, *Applied Surface Science*, Vol. 257, pp. 1540-1543, 2010.
 18. Hejazi, V., Dorri, A., Rohatgi, P. and Nosonovsky, P.M., “Beyond Wenzel and Cassie–Baxter: Second-Order Effects on the Wetting of Rough Surfaces”, *Langmuir*, Vol. 30, pp. 9423-9429, 2014.
 19. Tabrizi, S., “Effect of Mechanical Abrasion on Oil/Water Contact Angle in Metals”, M.S Thesis, University of Wisconsin, Milwaukee, 2012.
 20. Lua, B. and Lib, N. “Versatile Aluminum Alloy Surface with Various Wettability”, *Applied Surface Science*, Vol. 326, pp. 168-173, 2015.
 21. Kam, D., Bhattacharya, S. and Mazumder, J., “Control of the Wetting Properties of an AISI 316L Stainless Steel Surface by Femto-second Laser-Induced Surface Modification”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 22, pp. 6-13, 2012.
 22. Bo, W., Ming, Z. and Jian, L., “Superhydrophobic Surfaces Fabricated by Microstructuring of Stainless Steel using a Femto second Laser”, *Applied Surface Science*, Vol. 256, pp. 61-66, 2009.