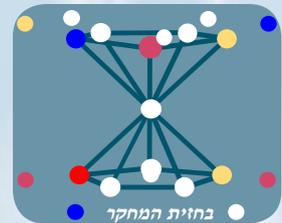


חומרים המתנקים מעצמם*



| פיטר פורבס** |

צמח הלוטוס. במקומות אחרים הוא חוזה אוהלים וסוככים העשויים מסוגי בד חדשים שנותרים צחים ללא התערבות יד אדם מנקה. אין הוא האדם היחיד שחוזה עתיד של חפצים שכמעט אינם דורשים שטיפה: טכנולוגים ביפן מפתחים משטחים לחדרי אמבט ולבתי חולים המפיגים מעצמם ריחות רעים ומחטאים את שטח הפנים שלהם. מייקל רוברט כהן מן המכון הטכנולוגי של מסצ'וסטס (MIT) חוזים טכנולוגיות דומות שישמרו על מראות האמבט נקיות מערפול ואחרות שיאפשרו שליטה על

היכולת המרהיבה של צמח הלוטוס לדחות לכלוך שימשה השראה לטכנולוגיות ניקוי וחיטוי עצמי שיסייעו אולי גם לשלוט בזרימת נוזלים בצינורות מיקרוסקופיים של "מעבדות על שבב"

לוויליאם ברתלוט מאוניברסיטת בון שבגרמניה, המגלה והמפתח של "אפקט הלוטוס", יש חזון: מנהטן המנקה את עצמה. על פי חזונו, די במעט גשם כדי לשטוף את החלונות ואת הקירות של גורדי השחקים ולעשותם נקיים מרבב כמו

* מאמר זה פורסם בגיליון דצמבר 2008 במגזין סיינטיפיק אמריקן ישראל (עמ' 38-45), בהוצאת רשת אורט ישראל. מגזין Scientific American נחשב לכתב העת המוביל בעולם בתחומי המדע והטכנולוגיה זה למעלה מ-160 שנה. המהדורה העברית מספקת, לצד חומרי מקור מתורגמים, התייחסות רחבה לעשייה המדעית גם בהקשר המקומי. אתר הבית: www.sciam.co.il
** פיטר פורבס (Forbes) הוא כתב מדעי המתגורר בלונדון. ספרו "כף רגלה של השממית" (הוצאת ר' ו' נורטון) מ-2006 סוקר מגוון טכנולוגיות המחקות את הביולוגיה (ביוממטיקה) או שקיבלו השראה ממנה. הוא היה גם העורך של "סקירת המאה: ספר השירה במאה ה-20 של הוצאת פינגווין" (פינגווין, 2000).



המגע. במשטח הידרופילי זווית המגע (בנקודת המגע שבין שטח הפנים של הטיפה למשטח) קטנה מ-30 מעלות. לטיפה על חומר הידרופובי שיש זווית מגע גדולה מ-90 מעלות.

וכן, הוא הבין שאין ספור הגבשושיות מגבירות את האפקט עוד יותר וגורמות לפני השטח של הלוטוס להיות סופר-הידרופוביים: זווית המגע של המים גבוהה מ-150 מעלות והטיפות הנוצרות על פני השטח מקבלות אפוא צורה כמעט כדורית, ובשל שטח המגע המזערי הן מתגלגלות בקלות כמו כדורי מסב. טיפות המים נשענות על שיאי הגבשושיות כמו אדם השוכב על מיטת מסמרים. האוויר הכלוא בין המים לבין שטח העלה, ברווחים שבין הגבשושיות, מגדיל את זווית המגע, אפקט שמתואר באופן מתמטי באמצעות משוואת קאסי-בקסטר, הקרויה על שם של א' ב' ד' קאסי וס' בקסטר שפיתחו אותה לראשונה בשנות ה-40 של המאה ה-20.

גם לכלוך, הבחין ברתלוט, נוגע רק בראשי הגבשושיות שעל פני עלה הלוטוס. טיפות הגשם מרטיבות את הלכלוך בקלות ומגלגלות אותו מן העלה. התגלית הזאת, שגבשושיות מיקרוסקופיות מגבירות את הניקיון, היא תגלית פרדוקסלית במידה מפליאה. אימא שלי הייתה אומרת ש"חורים וסדקים צוברים לכלוך", וכך סיכמה את הדעה העממית הרווחת שאם רוצים לשמור על דברים נקיים צריך לדאוג שיהיו חלקים. אבל התבוננות מעמיקה בעלי הלוטוס מראה שמוסר ההשכל הזה לא לגמרי נכון.

ברתלוט, שהיה בראש ובראשונה בוטנאי, לא ראה בתחילה את האפשרויות המסחריות הגלומות בתצפית שגבשושיות זעירות שומרות על העלים נקיים מרבב. אך בשנות ה-80 הוא הבין שאם יצליחו להכין משטחים שעוותיים מחוספסים, לאפקט הלוטוס המלאכותי יהיו יישומים רבים. אחר כך הוא רשם פטנט על הרעיון לייצר משטחים בעלי אזורים מיקרוסקופיים מוגבהים

הזרימה המיקרוסקופית ב"מעבדות על שבב" (מערכים כימיים זעירים שנוזלים זורמים בהם במעברים מיקרוסקופיים). כבר כיום יש גופיות, חולצות, הצאיות ומכנסיים הדוחים מעליהם כתמי קטשופ, חרדל, יין אדום וקפה. מהפכת המשטחים המתנקים מעצמם יצאה אפוא לדרך. סיפור החומרים המתנקים מעצמם מתחיל בטבע בצמח הלוטוס הקדוש (*Nelumbo nucifera*), צמח מים רב-שנתי קורן חן שמילא תפקיד מכריע בהתפתחות הדתות והתרבויות של הודו, בורמה, סין ויפן. הלוטוס נערץ בשל הטוהר יוצא הדופן שלו. הוא צומח במים בוציים, אך העלים שלו, המבצבצים ונישאים מעל המים נראים נקיים תמיד. לטיפות המים על עלה לוטוס יש ברק הנראה שלא מן העולם הזה, ומי הגשמים שוטפים לכלוך מן העלים ביעילות רבה יותר משהם עושים בכל צמח אחר.

תכונת הניקיון הזאת היא שמשכה את תשומת לבו של ברתלוט. בשנות ה-70 הוא התפעל מן האפשרויות הגלומות במיקרוסקופ האלקטרוני הסורק, שיצא לשוק ב-1965, והפיק תמונות חדות עד לקנה המידה הננומטרי. במידת הגדלה כזאת, עלולים גרגרי אבק להרוס את התמונה, ולכן יש צורך לנקות את הדוגמאות. אבל ברתלוט שם לב שיש צמחים שכמעט לעולם אין צורך לשטוף אותם, ונסיד הצמחים האלה היה הלוטוס.

ברתלוט הבין שהתכונה הזאת היא תוצאה משולבת של שני מאפיינים של פני העלה: השעווה המכסה אותם והגבשושיות המיקרוסקופיות (שגודלן כמה מיקרונים) הפזורות עליהם. ידיעותיו הבסיסיות בפיזיקה אישרו שהשעווה לבדה עושה את העלים הידרופוביים או "שונאי מים". טיפות מים המונחות על חומר כזה ניצבות גבוה מעל המשטח כדי לצמצם ככל האפשר את שטח המגע [ראו תיבה תחתונה בעמוד הבא]. טיפת מים המונחת על חומר הידרופילי, או "אוהב מים", נמרחות עליו כדי להרחיב ככל האפשר את שטח



ולא להותיר שאריות. המוצר שכנע סוף-סוף כמה חברות כימיה גדולות שהטכניקה מעשית, וזרועות המחקר החזקות שלהן מצאו עד מהרה דרכים נוספות לנצל את האפקט. היישום המוביל עד כה הוא StoLotusan, צבע לחזיתות של בניינים שהוציאה לשוק החברה הגרמנית הרב-לאומית סטו ב-1999 ונחל הצלחה מסחררת. השם "אפקט הלוטוס" הוא כיום מטבע לשון שגורה במשקי הבית בגרמניה. באוקטובר 2007 מנה כתב העת הגרמני לעסקים Wirtschaftswoche את אפקט הלוטוס כאחת מ-50 התגליות הגרמניות החשובות ביותר בשנים האחרונות.

סוף לאסונות במסעדה

אם תבקשו מאנשים להשלים את המילה החסרה בביטוי "...מתנקים מעצמם", יבחרו רובם במילה "בגדים". איננו מנקים לעתים קרובות את חזית בתינו, אבל תמיד נכבס את בגדינו. לאחר התחלה מהססת, צצים בדים בעלי כושר ניקוי עצמי בכל פינה. והכול התחיל עם Nano-Care.

הממציא והיזם דיוויד סואן הוא שפיתח את ציפוי הבדים הזה, המיוצר כיום בחברתו Nano-Text. חשבו על פלומת האפרסק. כעת דמיינו את האפרסק מתחת לזרם של מי ברז ותראו בעיני רוחכם את אפקט Nano-Care. ה"פלומה" בציפוי הזה עשויה מזיפים זעירים המוצמדים לסיבי כותנה. הזיפים כה קטנים, פחות מאלפית

כדי לעשותם מתנקים מעצמם וטבע סימן מסחרי לשם "אפקט הלוטוס".

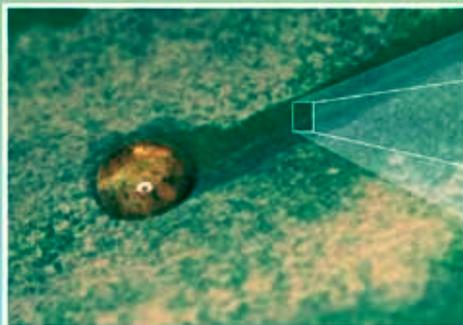
תכנון משטח סופר-הידרופובי על פניהם של חפצים באמצעות אפקט הלוטוס לא היה קל - חומר הידרופובי מטבעו דוחה חומרים אחרים, אבל כדי להשתמש בחומר כזה, הדוחה הכול, יש להדביקו לחפצים. ועם זאת, בראשית שנות ה-90 יצר ברתלוט את "כפית הדבש". הכפית מצופה במשטח סיליקון תוצרת בית בעל חספוס מיקרוסקופי המאפשר לדבש להחליק על פניו

מושגי מפתח

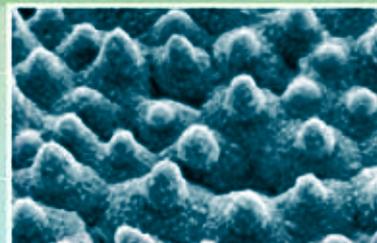
- גבשושיות מיקרוסקופיות המכסות את עלי הלוטוס מקנות לפני השטח השעוותיים שלו יכולת גבוהה במיוחד לדחות מים ועושות אותם לחומר סופר-הידרופובי. טיפות הגשם מתגלגלות בקלות על פי משטח כזה ומסלקות כל לכלוך.
- חוקרים פיתחו חומרים מלאכותיים בעלי כושר ניקוי עצמי, מקצתם מבוסס על "אפקט הלוטוס" הזה. חומרים אחרים מראים תכונה הפוכה: פני השטח של חומרים אלה פועלים גם כזרזים כימיים.
- במוצרים עתידיים יהיו חומרים המשלבים את שתי התכונות הסותרות: סופר-הידרופוביות וסופר-הידרופיליות או חומרים שיוכלו לשנות את זיקתם למים, הלוך-ושוב, כדי לשלוט בזרימתם של נוזלים ברכיבים מיקרוסקופיים.

ההשראה - אפקט הלוטוס

היכולת המדהימה של עלה הלוטוס להישאר נקי שימשה השראה לפיתוח חומרים בעלי כושר ניקוי עצמי.



טיפת מים מתגלגלת על פני העלה, אינה נדבקת אליו ונושאת עמה לכלוך.



בגשושיות מיקרוסקופיות (בגודל של כמה מיקרונים), המכסות את כל שטח העלה, הן המפתח לכושרו לדחות מים. כיסוי מחוספס של נבישי שנווה נוסקופיים המצפה את הגבשושיות האלה מביר עוד יותר את האפקט.



לקחי הלוטוס - להישאר נקי

הצבת סטנדרטיות יצר אריזנים הסטנדרטים לדחות טיפוס וכתמי מזון משום שהם סופר-הידרופוביים כמו עלה לוטוס (למעלה). האפקט נוצר על ידי שינוי סיבי הכותנה על החומר. באחת השיטות (למטה), חלקיקים זעירים יוצרים גבשושיות על פני הסיבים בקוטר של כמה מאות ננומטרים. מוצרים רבים אחרים, כמו צבעים לחית הבית או רעפים לגן, מסוים ציפוי בעל חספוס מיקרוסקופי או נוסקופי המקנה להם את אפקט הלוטוס.



סיב כותנה לא מסופל

סיב כותנה מסופל

ובהם כושר דחיית מים ושמירה על ביצועים לאחר סבבי כביסה רגילה ומבחני בליה אחרים. בבדיקות שערכתי בעצמי הוכיחו דוגמאות של בדי NanoSphere כושר מרשים לנוער מעצמן רוטב עגבניות שמנוני, קפה ויין אדום, שהם כמה מן המכתימים הגרועים ביותר.

בגדים קלי-ניקוי נעשים נפוצים, אבל השוק הגדול ביותר (במונחים של הוצאות כספיות) לציפויים המבוססים על אפקט הלוטוס הוא כנראה שוק הסוככים, האוהלים והמפרשים. איש אינו רוצה באמת לנקות את מבני החוץ הגדולים האלה.

הירטבות-על

חקר אפקט הלוטוס החל בניסיון להבין את כושר ההתנקות העצמית של משטח מסוג אחד - משטח שעוותי המכוסה במבנים מיקרוסקופיים או אפילו ננוסקופיים. המחקר הזה התרחב עתה למדע חדש העוסק בכושר הירטבות (wettability), בניקוי עצמי ובחיטוי. חוקרים החלו להבין שיש דרכים רבות ליצור משטחים סופר-הידרופוביים, ושגם היפוך התכונה הזאת - סופר-הידרופיליות - יכול להיות מעניין. השחקן הראשי בתחום הסופר-הידרופיליות הוא המינרל טיטניום דו-חמצני או טיטניה (titania).

גובהן של גבשושיות הלוטוס, עד שסיב הכותנה נראה כגזע עץ לעומתם.

יריבתה של Nano-TEX היא החברה השווייצרית שולר טקסטיל המכנה את הטכנולוגיה שלה בשם NanoSphere. בשיטה הזאת מכסים את סיבי הבגדים בחלקיקים ננוסקופיים של סיליקה (צורן דו-חמצני) או פלסטיק המעניקים לסיב את החספוס הגבשושי דמוי הלוטוס.

הרבה טענות לא בדוקות מושמעות כדי לתמוך במוצרים ננוטכנולוגיים. מכוני התקנים מתחילים אפוא לקבוע בדיקות מחמירות לבגדים בעלי כושר ניקוי עצמי המבוססים על חידושים בתחום זה. מכון המחקר הגרמני הוהנשטיין, מציע מבדקים ואישורים לגופים מסחריים ותעשייתיים בכל העולם. מכון זה קבע באוקטובר 2005 שאריגי NanoSphere הם הבדים הראשונים בעלי כושר ניקוי עצמי שעמדו בסדרה מלאה של מבדקים

הבסיס - הפיסיקה של הלוטוס

אפקט הניקוי העצמי של הלוטוס נובע מכך שפני השטח של העלה הידרופוביים (דוחי מים) ביותר. ההידרופוביות או ההידרופיליות (משכיחה למים) של החומר קובעות את זווית המגע בין החומר לשטח הפנים של המים.

כיצד הלוטוס מנקה את עצמו

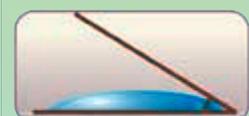


טיפת מים מחליקה על משטח טיפוס (לא הידרופובי ולא הידרופילי במיוחד) ומותירה את רוב הלכלוך מאחור.



טיפת המים מתגלגלת על פני המשטח הסופר-הידרופובי, אוספת את הלכלוך ונתשאת אותו עמה. הזיקה בין המים ללכלוך גדולה מן הזיקה שיש לכל אחד מהם למשטח.

זוויות מגע



משטח הידרופילי:
פחות מ-30 מעלות



משטח הידרופובי:
יותר מ-90 מעלות



משטח סופר-הידרופובי:
יותר מ-150 מעלות

הזווית הקרה נובעת מגבשושיות הלכדות אוויר בין המים למשטח ומקטינות את שטח המגע ביניהם.



הם יכולים לפעול על מולקולות מים וחמצן, המצויות על פני השטח של הטיטניה, וליצור יונים רדיקליים על-חמצניים (סופראוקסידים - O_2^-) ורדיקלים הידרוקסיליים (OH), שניהם צורונים כימיים פעילים מאוד שמסוגלים לפרק חומרים אורגניים לפחמן דו-חמצני ולמים.

באמצע שנות ה-90 גילו שלושת החוקרים היפניים תגלית מכריעה בקשר לטיטניה. הם הכינו שכבה דקה של החומר מתוך תרחיף מימי של חלקיקי טיטניה וקלו אותה בטמפרטורה של 500 מעלות צלזיוס. לאחר שחשפו המדענים את הציפוי השקוף שנוצר לאור אולטרה-סגול, הוא הראה כושר הירטבות מוחלט ויוצא דופן: זווית מגע של אפס מעלות, גם לשמן וגם למים. האור האולטרה-סגול מסיר כמה מאטומי החמצן מעל פני השטח של הטיטניה ויוצר טלאים ננומטריים שאליהם נספחות קבוצות הידרוקסיליות. הטלאים האלה מראים סופר-הידרופיליות. האזורים האחרים אחראים על הזיקה הגבוהה לשמן. התכונה הזאת נותרת על כנה במשך כמה ימים לאחר החשיפה לקרינה האולטרה-סגולה, אך החומר חוזר אט-אט למצבו הקודם כשמשאירים אותו בחשכה.

שונאים סיפור אהבה

דוגמאות למשטחים, מאוהבי מים ועד שונאי מים, וזוויות המגע המקורבות שלהם:

- סופר-הידרופילי: שכבות טיטניה דקות, 0 מעלות [ראו תיבה בעמוד הבא]
- הידרופילי: זכוכית רגילה, 30 מעלות
- הידרופובי: טפלון, 100 מעלות
- סופר-הידרופובי: עלי לוטוס, 160 מעלות

אף על פי שתכונות הטיטניה הפוכות לגמרי מאלו של עלה הלוטוס, מתברר שסופר-הידרופיליות מעניקה גם לחומר הזה כושר טוב לניקוי עצמי: המים נוטים להימרח על פני כל השטח, ושכבת

מסעה של הטיטניה למעמד של כוכב במדע החומרים החל לפני ארבעים שנה בתכונה שאין לה שום קשר לכושר הירטבות. ב-1967 גילה אקירה פוג'ישימה, אז סטודנט מחקר באוניברסיטת טוקיו, שכשחושפים טיטניה לאור אולטרה-סגול, מסוגל החומר לפרק מולקולות מים לחמצן ולמימן. פירוק מים באמצעות אור, או פוטוליזה, היה כבר מזמן סוג של "גביע קדוש" מדעי. אם יהיה התהליך יעיל די הצורך הוא ייצר מימן זול דיו שיוכל לשמש תחליף נקי מפחמן לדלקים מחצביים. פוג'ישימה וחוקרים אחרים עבדו במרץ על הרעיון, אבל בסופו של דבר נוכחו לדעת שהסיכוי להשיג ניצולת מסחרית הוא קלוש.

המחקרים חשפו ששכבות דקות של טיטניה (בעובי של ננומטרים עד מיקרונים) פעלו ביעילות רבה יותר מחלקיקים גדולים יותר. ואז, ב-1990, לאחר שהצטרף פוג'ישימה לקזוהיטו השימוטו מאוניברסיטת טוקיו ולטושייה וטנבה מחברת TOTO המייצרת ציוד סניטרי, הם גילו שאור אולטרה-סגול המוקרן על שכבות טיטניה בעובי ננומטרי משפעל אותן ומאפשר להן לזרז תגובות כימיות (אפקט פוטו-קטליטי) של פירוק חומרים אורגניים, ובהם מרכיבי דופן התא של חיידקים, לפחמן דו-חמצני ולמים.

טיטניה מפגינה פעילות פוטו-קטליטית מפני שהיא חומר מוליך-למחצה: כמות מתונה של אנרגיה מעוררת אלקטרון מרמות האנרגיה המלאות של "פס הערכיות" במינרל, ומעלה אותו מעבר לפער שבין הפסים (המכיל רמות אנרגיה אסורות) אל "פס ההולכה", הריק, שבו יכולים האלקטרונים לזרום ולהולך זרם חשמלי. בטיטניה מתבצע הדבר באמצעות פוטון של אור אולטרה-סגול באורך גל של כ-388 ננומטר. העירור יוצר שני נושאי מטען ניידים: האלקטרון שהוקפץ אל פס ההולכה וה"חור" שנותר בפס הערכיות, המתנהג כחלקיק בעל מטען חשמלי חיובי (ראו תיבה בעמוד הבא). כששני המטענים האלה חופשיים,



חברת פילקינגטון, יצרנית הזכוכית הגדולה ביותר בבריטניה. בדרך כלל מייצרים זכוכית בטמפרטורות גבוהות מ-1,600 מעלות צלזיוס על מצע של בדיל מותך. כדי לייצר את ציפוי האקטיב-גלאס מזרימים אדים של טיטניום ארבע-כלורי על פני הזכוכית באחד משלבי הקירור המאוחרים יותר. האדים משקיעים שכבת טיטניה דקה מ-20 ננומטרים. זגוגיות אקטיב-גלאס נעשות מקובלות בבריטניה בגנות של חממות ובמראות צד של כלי רכב.

למרבה הצער, זגוגיות רגילות חוסמות את גלי האור האולטרה-סגול המשפיעים את הטיטניה, ולכן שכבות-ננו מן החומר הזה שימושיות פחות בתוך הבית. התשובה לכך היא "סימום", זריעת אטומים של חומרים אחרים בשכבת הטיטניה, בדיוק כפי שעושים לצורן (סיליקון) ולמוליכים-למחצה אחרים בתעשיית האלקטרוניקה. פעולת הסימום הזאת מקטינה את פער הפסים בחומר, כלומר אורכי הגל הארוכים יותר של התאורה הביתית יכולים לעורר את הפעילות הפוטו-קטליטית. שינרי סאטו מאוניברסיטת הוקאידו ביפן גילה בדרך מקרה ב-1985 את יתרונות סימום הטיטניה באטומי חנקן. אפשר להשתמש גם באטומי כסף למטרה זו. אך רק בשנים האחרונות תורגמו הגישות האלה לתהליכים מסחריים.

הדעת נותנת שטיטניה שעברה סימום תמצא שימושים רבים במטבחים ובחדרי אמבטיה בשל תכונותיה המחטאות ומפיגות הריח. טיטניה משמשת גם באריגים בעלי כושר ניקוי עצמי מפני שהיא מוסיפה להם יכולת להפגת ריח. כמה שיטות פותחו כדי להצמיד אותה לבד, ובהן קישור כימי ישיר.

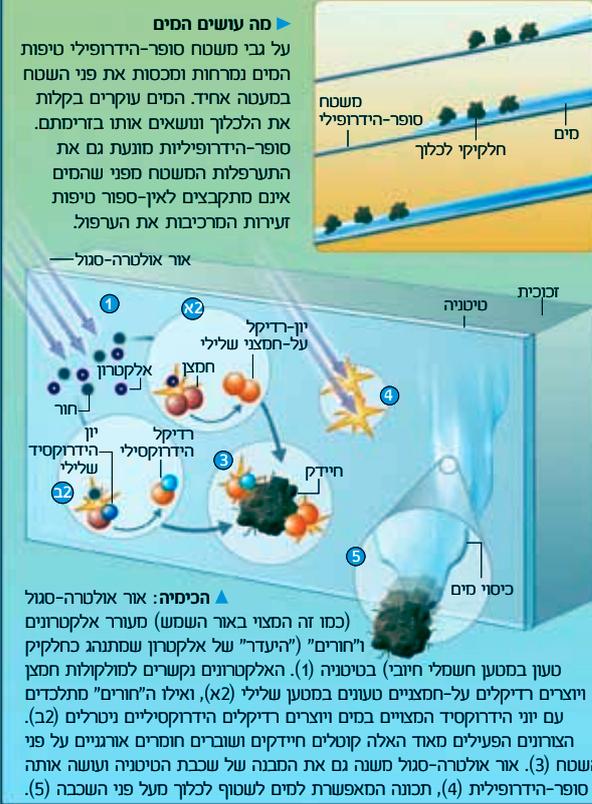
התכנסות של ניגודים

החומרים שנוצרו בהשראת עלי הלוטוס ושכבות הטיטניה הדקות עומדים לכאורה בשני קטבים מנוגדים שבדרך כלל קשה למצוא כדוגמתם

המים הזורמים נושאת את הלכלוך הלאה. המשטח גם אינו מתערפל, מפני שאדי המים המתעבים נמרחים לצדדים ואינם מצטברים באלפי טיפות זעירות המרכיבות את הערפל. כמו כן, הפעילות הפוטו-קטליטית של הטיטניה מוסיפה לחפצים המצופים בה גם כושר חיטוי והפגת ריח באמצעות קטילת חיידקים ופירוק

גישה מנוגדת- טיטניה המתנקה מעצמה

שכבות דקות של טיטניה מראות תכונה הפוכה לגמרי מעלי הלוטוס: סופר-הידרופיליות. ועם זאת, גם הן דוחות לכלוך ובעלות פעילות חיטוי נגד חיידקים.



חומרים אורגניים.

תעשיית ציפויי הטיטניה מתפתחת עתה. חברת TOTO, לדוגמה, מייצרת מגוון של מוצרים פוטו-קטליטיים בעלי כושר ניקוי עצמי כמו אריחי קרמיקה לשימוש חוץ, והיא מעניקה זיכיונות לטכנולוגיה ברחבי העולם.

שכבות הטיטניה הננומטריות שקופות, ולכן ציפוי זגוגיות היה צעד צפוי ומובן מאליו. המוצר הראשון שיצא לשוק היה אקטיב-גלאס, של



אורגניים, שבניגוד לרוב החומרים הפלסטיים הרגילים נושאים מטען חשמלי, חיובי או שלילי. רובנר וכהן עורמים זו על גבי זו לסירוגין שכבות של הפולימר פולי(אליל-אמין הידרוכלוריד), הטעון במטען חשמלי חיובי ושל חלקיקי סיליקה הטעונים במטען חשמלי שלילי. (במחקר קודם לכך הם השתמשו בציפוי בחלקיקי סיליקה כדי לחקות את המשטח ההידרופובי המחוספס של הלוטוס).

את המבנה הרב-שכבתי הזה הם ציפו לבסוף בצורן (שהוא חומר הידרופובי), אבל כשעשו זאת הם שמו לב למשהו מעניין: לפני שהניחו את ציפוי הצורן, הייתה עוגת השכבות למעשה סופר-הידרופילית. שכבות הסיליקה בניסויים של רובנר וכהן יצרו משטחים צפופים של נקבוביות ננומטריות הפועלות כמו ספוג, או פתיל של נר, ששואב מיד כל טיפת מים מעל פני השטח - תופעה המכונה בשם פתילות-ננו. שכבות הסיליקה-פולימר שפיתחו החוקרים אינן מתכסות לעולם בערפל, אפילו לא כשמחזיקים אותן מעל מים מהבילים. אם הנקבוביות מתמלאות, מתחילים המים לזרום מעבר לשפה. כשתנאי הלחות מסתיימים,

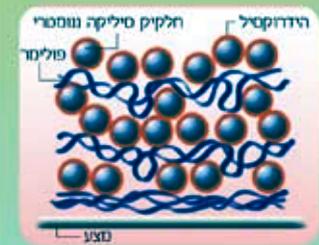
בעולם היום-יום, שבו, כפי שכתב המשורר האנגלי פיליפ לרקין, "אין דבר שאפשר לעשותו כחדש או נקי למשעי". במשך זמן רב היו השיטות והחומרים שונים לגמרי, וחקר האפקט הסופר-הידרופובי נערך לגמרי בנפרד מחקר הסופר-הידרופיליות הפוטו-קטליטית. אבל לאחרונה חל מיזוג בלתי רגיל: חוקרים עובדים היום על שילוב שני האפקטים ויישומם בחומרים דומים מאוד. חוקרים מחפשים אפילו דרכים לגרום למבנה כימי יחיד לעבור מסופר-הידרופוביות לסופר-הידרופיליות ובחזרה.

הראשונים שרמזו על המיזוג הזה בשנת 2000 היו חלוצי חקר הטיטניה פוג'ישימה, וטנבה והשימוטו. הם ביקשו להשתמש בטיטניה כדי להאריך את חייהם של משטחים בעלי אפקט הלוטוס. במבט ראשון נראה שהגישה הזאת נועדה מראש לכישלון: היה צפוי שהפעילות הפוטו-קטליטית של הטיטניה תתקוף את הציפוי השעוטי ההידרופובי של משטחי הלוטוס ותהרוס את האפקט. ואכן, הרס כזה אכן נגרם בריכוזי טיטניה גבוהים. אבל הקבוצה גילתה שהוספת כמות זעירה של טיטניה מאריכה במידה ניכרת את פעילות אפקט הלוטוס בלי לשנות במידה רבה את זווית המגע הקהה הדרושה לדחייה חזקה של מים.

ב-2003 גילתה מעבדתם של רובנר וכהן ב-MIT ששינוי זעיר במבנה המשטח עשוי לקבוע איזו תכונה תוקנה לו: סופר-הידרופיליות או סופר-הידרופוביות. במהלך ביקור בסין באותה שנה, נזכר רובנר, הוא התרגש מאוד ממבנים סופר-הידרופוביים שהוזכרו בכינוס. בשובו למעבדה הוא הורה לכמה מחברי קבוצת המחקר שלו לנסות ליצור מבנים כאלה. מעבדתו פיתחה שיטה של ייצור קרומים דקים, שכבה אחרי שכבה, מתרכובות פוליאלקטרוליטיות. כשממיסים במים חומרים אלקטרוליטיים רגילים, כמו מלח שולחן או חומצה גופרתית, הם נפרדים ליונים חיוביים ושליליים. פוליאלקטרוליטים הם פולימרים

טכנולוגיה רב שכבתית - ציפוי נגד ערפול

חוקרי המכון הטכנולוגי של מסצ'וסטס (MIT) פיתחו ציפוי סופר-הידרופילי רב-שכבתי חסין ערפול וסוגע השתקפיות.



שכבת של חלקיקי סיליקה ננומטריים (שקבוצת הידרוקסיליות קשורות לפני השטח שלהם) ועל פלימר יוצרות לסירוגין ציפוי סופר-הידרופילי שאפשר להניח על זכוכית וגל חומרים אחרים. פני השטח של הציפוי זורעים נקבוביות ננומטריות וקבוצות הידרוקסיליות הידרופיליות מאוד עוזרות לנקבוביות לספוג מים ולסלק אותם מיד ספי השטח.



לוח זכוכית מצופה בסגסגה רב-שכבתי נותר צלול לאחר שמטפנים אותו במקרר ולאחר מכן מציבים אותו באוויר חם ולח (משמאל), תנאים שבהם זכוכית רגילה מתערפלת (מימין).



מתאדים המים בפתילי הננו בהדרגה.

מים באזורים שחונים.

זכוכית מורכבת בעיקר מסיליקה, ולכן הציפוי הרב-שכבתי מתאים מאוד ליישום על זגוגיות. הציפוי הסופר-הידרופילי אינו רק שקוף ומונע ערפול אלא גם מונע השתקפויות. צוותו של רובנר משתף פעולה עם התעשייה כדי להפוך את התגלית למסחרית. יישומים אפשריים כוללים מראות לחדר אמבטיה שלעולם אינן מתכסות באדים ושמשות קדמיות של מכוניות שלעולם אין צורך להפיח על פניהן אוויר חם בבקרים החורפיים הקרים. שלא כטיטניה, המשטחים של רובנר פועלים באותה יעילות באור ובחושך.

כפי שקורה לעתים קרובות כל כך, מנגנון איסוף המים של החיפושית התגלה בידי חוקר שחיפש משהו אחר לגמרי. ב-2001 נתקל הזואולוג אנדריו ר' פרקר, אז באוניברסיטת אוקספורד, בתצלום המראה חיפושיות אוכלות חגב במדבר נמיב. החגב, שנסחף לשם ברוחות העזות של האזור, מת מיד בנפלו על החול הלוהט. ולעומת זאת, לחיפושיות שניזונו מן המתנה שקיבלו, פשוטו כמשמעו, משמים, היה בביור נוח במדבר. פרקר שיער שפני השטח שלהן מחזירות חום באופן מתוחכם.

חיפושיות מתוחכמות

מיליוני שנים לפני ששילבו מדענים בין אפקט הלוטוס לבין הירטבות-על ביישומים טכנולוגיים, הייתה עסוקה חיפושית קטנה במדבר נמיב שבאפריקה הדרומית ביישום שני האפקטים האלה למטרה אחרת: איסוף מים לשם הישרדותה שלה.

ואכן, חיפושיות סטנוקרה מחזירות חום, אבל כשבחן פרקר בחן את גבן הוא חשד מיד שלפניו התאמה כלשהי של אפקט הלוטוס שמאפשרת את תהליך איסוף המים בבוקר. רוב שטח הגב של חיפושית סטנוקרה מכוסה משטח גבשושי, שעוותי וסופר-הידרופובי. אבל ראשי הגבשושיות נקיים משעווה והידרופיליים. הנקודות ההידרופיליות האלה לוכדות מים מן הערפל, יוצרות טיפות קטנות, שגדלות במהירות לממדים המאפשרים לכוח הכבידה ולסופר-הידרופוביות של הסביבה לעקור אותן ממקומן. בניסויים במעבדה על לוחות זכוכית גילה פרקר שסידור כזה של אזורים יעיל פי שניים ממשטח חלק ואחיד, אם הוא הידרופובי ואם הידרופילי.

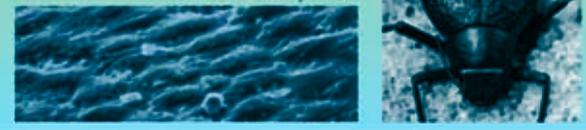
מדבר נמיב הוא מקום עוין מאוד. הטמפרטורות ביום עלולות להגיע ל-50 מעלות צלזיוס והגשם נדיר ביותר. מקור הלחות היחיד כמעט הוא ערפילי הבוקר הסמיכים הנישאים בדרך כלל ברוח הקרירה. החיפושית סְטְנוֹקְרָה פיתחה דרך לאסוף את המים שבערפילים האלה: היא גוחנת מול הרוח הערפילית, ראשה מטה וגבה מונף אל על. המים מתעבים על הגב ומטפטפים מטה לתוך הפה. ההסבר המדעי לשיטת איסוף המים של החיפושית שימש השראה לרעיונות לאיסוף

פרקר רשם פטנט על תכנית לחיקוי איסוף המים של החיפושיות, וחברת QinetiQ, קבלנית משרד ההגנה הבריטי, מפתחת אותה כדי לקצור ערפילים באזורים שחונים. גם אחרים מנסים לחקות את חיפושית סטנוקרה. ב-2006 יצר צוותם של רובנר וכהן נקודות סופר-הידרופיליות של סיליקה על גבי משטח רב שכבתי סופר-הידרופובי. העיצוב הזה יעיל משל החיפושיות שהנקודות שעל גבן הן רק הידרופיליות.

מדע הירטבות-העל החדש מאפשר לשלוט בזרימה של נוזלים בקנה מידה מיקרוסקופי וננוסקופי

אפקטים משולבים - איסוף מים

מדענים שקיבלו השראה מחיפושית סטנוקרה החליטו שיתאם את שילוב של אפקט הלוטוס ושל סופר-הידרופיליות כדי ללכוד מים מן האוויר באזורים שחונים ויבשניים. החיפושית מסוג סטנוקרה אוספת מים מערפילי הבוקר הישנים ברח במדבר נמיב שבאפריקה. החיפושית רוכזת כענבה סגוף מעלה אל פה הרח (סימן). מרבית השטח של גב החיפושית הוא סופר-הידרופובי כשל בעששיות בעדל תפי סיליסטר וחסמים מיקרוסקופיים של פני השטח השעוותיים שלה (למטה). אבל טיפות המים ואספות בכל זאת על פני אזורים הידרופיליים יוצרים בשיאי הגבושיות. הטיפות מתגלגלות מטה לתוך פיה של החיפושית.



מעבר לניקוי העצמי - משטחים ניתנים למיתוג

באמצעות מיתוג ההידרופוביות במיקום מדויק על פני המשטח מקווים הסדענים שלום בוריתם של נוזלים דרך רשתות של תעלות מיקרוסקופיות ב"שבבי זרימת מיקרו".

משטח סופר-הידרופובי **משטח סופר-הידרופילי**

▲ חוקרים באוניברסיטת פוהנג למדע וטכנולוגיה בדרום קוריאה חיברו מולקולות המבוססות על אזובנן אל פני השטח של משטח רב-שכבתי של סיליקה ופולימר [ראו תיבה בעמוד הקודם]. קבוצות הידרופוביות בקצה המולקולות וחספוס העכבות גורמים למשטח להיות סופר-הידרופובי (שמאל) אבל, באור אולטרה-סגול, המולקולות מתכופפות, הקבוצות ההידרופוביות נקברות, ופני השטח נעשים סופר-הידרופיליים (מימין). אור נראה מחזיר סיד את המצב לקדמותו.

▶ מים צמדים לאזורים שנגעו סופר-הידרופיליים באמצעות אור אולטרה-סגול שהוקרן על משטח שעבר ציפוי. מים שהונחו על האזורים האחרים סקבלים את המראה הכמעט כדורי האופייני לאפקט הלוטוס.

אזובנן למשטח סופר-הידרופובי רב-שכבתי של סיליקה-פוליאלקטרוליט מצופה צורן. גם המשטח החדש הוא סופר-הידרופובי, אבל בהשפעת אור אולטרה-סגול משנה תרכובת האזובנן את המבנה שלה והופכת את המשטח לסופר-הידרופילי [ראו תיבה לעיל]. אור בתחום הנראה מחזיר את המצב לקדמותו.

לבקרה כזאת יהיה אפשר למצוא שימושים חשובים בתחום זרימת המיקרו, כמו בשליטה במערכים מקרוסקופיים המשמשים היום לסריקת תרופות ובמבדקים ביוכימיים אחרים. למשל, מעברים הידרופיליים יכולים להיסגר או להיפתח על ידי מיתוג חלקים בהם והפיכתם להידרופוביים או הידרופיליים בהתאמה.

יבש מתחת למים

אחת ההפתעות הנעימות של המאה ה-21 היא

כפי שמדגימים משטחי הסטנוקרה המלאכותיים. הדבר עשוי לשמש ביישומים מתוחכמים הרבה יותר משמירה על משטחים נקיים. אומר רובנר: "ברגע שאתה מבין שמשטחים מעוצבים יכולים להיות סופר-הידרופוביים או סופר-הידרופיליים בהתאם לכימיה של פני השטח, נפתחות אפשרויות רבות." שימוש מעניין במיוחד יוכל להיות למשטחים הניתנים למיתוג, כאלה שאפשר להחליף את כושר ההירטבות שלהם במיקומים מדויקים.

אפשר להשיג מיתוג כזה בדרכים רבות: אור אולטרה-סגול, חשמל, טמפרטורה, ממס או חומציות. ב-2006 הצליח צוות בראשות קילוון צ'ו מאוניברסיטת פוהנג למדע וטכנולוגיה בדרום קוריאה להשיג מיתוג מלא באמצעות הצמדת מולקולות של תרכובת המבוססת על





חיקוי הביולוגיה

השראה ביולוגית לטכנולוגיות
המצויות בפיתוח:

שערות ננוסקופיות (לחטה)
המאפשרות לשמסיות
לטייל על התקרה.

דבק צדפות הפועל
מתחת למים.

קורי עכביש חזקים
יותר מפלדה
באותו משקל.

שזוהר הלוטוס חודר לסדקים ולחריצים שהיו עד כה בלתי ידועים, גם הרבה מעבר ליישומים של ניקוי עצמי.

ברתלוט, שראה את האפשרויות הגלומות בטיפת מים אחת על עלה לוטוס, רואה עתה נופים ללא גבול כמעט. אבל הוא מזהיר שמי שרוצה לתרגם את הטבע לטכנולוגיה עלול להיתקל בספקנות רבה, כדבריו. "בטחו במה שענייכם רואות ולא בספרי הלימוד, ואם אתם מצליחים לאשש שוב ושוב את תצפיותיכם, פרסמו אותן", הוא מייעץ. "אבל היאזרו בסבלנות רבה וצפו לדחיות רבות של המאמר."

שלא במפתיע הוא חסיד נלהב של המגוון הביולוגי. הוא בטוח שצמחים ובעלי חיים רבים אחרים עשויים להראות תכונות שימושיות, ובהם כנראה גם מינים שאינם מוכרים למדע ועומדים על סף הכחדה. מחקרו הנוכחי עוסק בסופר-הידרופוביות מתחת למים. לאחר שבחן כיצד צמחי מים, כמו פיסטיה ("חסת מים") והשרך הצף סלוויניה, לוכדים אוויר על פני משטחי העלים שלהם, יצר ברתלוט בדים שנשארים יבשים במשך כמה ימים מתחת למים. הוא מקווה ליצור בגד ים בלתי נרטב. אבל הפרס הגדול יהיה אם יצליח להקטין את הגרר של גופי אוניות. הלוטוס אולי דוחה לכלוך, אבל הוא מושך אליו שורה מרשימה של פטנטים.

ועוד בנושא

The lotus effect. Hans Christian von Baeyer in **The Sciences**, Vol. 40, No. 1, pages 12-15; January/February 2000.

Water capture by a desert beetle. Andrew R. Parker and Chris R. Lawrence in **Nature**, Vol. 414, pages 33-34; November 1, 2001.

Self-cleaning surfaces - Virtual Realities. Ralf Blossey in **Nature Materials**, Vol. 2, No. 5, pages 301-306; May 2003.

The gecko's foot. Peter Forbes. W. W. Norton, 2006.

Patterned Superhydrophobic Surfaces: Toward a Synthetic Mimic of the Namib Desert Beetle. Lei Zhai et al. in **Nano Letters**, Vol. 6, No. 6, pages 1213-1217; June 2006.

The dream of staying clean: Lotus and biomimetic surfaces. Andreas Solga, Zdenek Cerman, Boris F. Striffler, Manuel Spaeth and Wilhelm Barthlott in **Bioinspiration & Biomimetics**, Vol. 2, No. 4, pages S126-S134; December 2007.

