

להתראות בשמחוח"ת

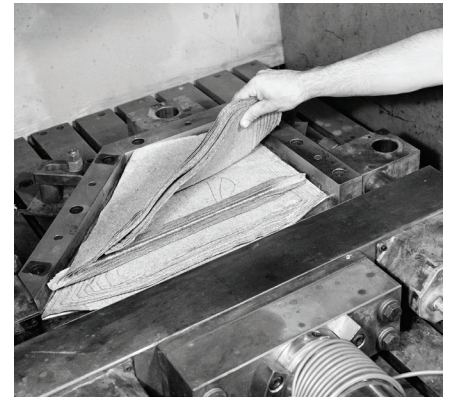
על שורשיו ותרומותיו של שטח מחקר חומרים ותהליכים

כתב פרופ' שמואל קניג בסיוע ד"ר דב דרמן, מאיר חפץ, יעקב מגד, פסח נבות וד"ר נפתלי ק. כתבה 24 בסדרת כתבות על תולדות רפאל בעריכת ד"ר ראובן אשל

שורשי השטח

שטח שמחוח"ת הוקם ב-1974 על-ידי אברהם פור ז"ל, על בסיס תחום מטלורגיה, שעבר מבית המלאכה, ורוב התחומים של שטח כימיה (פרט לתחום הודפים שהצטרף לשטח הנעה בחטיבת אווירומכניקה). הרעיון היה לרכז ביחידה אחת את יכולות הפיתוח והייצור של רכיבים טכנולוגיים מיוחדים, שלא ניתן לייצר מחוץ לרפאל מסיבות טכנולוגיות או ביטחוניות. אנשי המפתח בהקמת השטח היו: שמואל רטנר-רון (פושקין) ז"ל - בנושאי חומרים מרוכבים, בידודים ועוד, אדק יניב ז"ל - בנושא ציפויים, ד"ר נחום עצמון - בנושאי מטלורגיה, וד"ר שמואל קניג, בנושאי פלסטיקה וגומי.

לצוות זה, ובפרט לפושקין, כבר היו תרומות פרויקטיות נכבדות ב-25 השנים שקדמו להקמה. כדוגמאות לתרומותיו של פושקין נציין גוף פיברגלס לסירות חיל הים¹, כנפיים והגאים לטיילי "לוז"² בטכניקת חלונות דבש, בידודי דורסטוט למנועי טילים אלה וכן כנפיים מדורסטוט לטייל אוויר-אוויר "שפיר-2"³ (איור 1), ייזום הכניסה לטכנולוגיית מעגלים מודפסים⁴ - יוזמה שעל בסיסה הוקם שטח מע"ם.



איור 1: ייצור כנף דורסטוט ל"שפיר-2"

הידושים טכנולוגיים בשמחוח"ת

מעבר למוקדי הידע שקלטה, הוקמו בשמחוח"ת בהמשך מוקדים חדשים לפי צורכי הזמן ובהם ציפויים אופטיים ומקורות אנרגיה עם דגש על סוללות תרמיות. את טביעות אצבעותיה של שמחוח"ת ניתן היום למצוא בכל הפרויקטים של רפאל. בד-בבד עם פיתוחן של מערכות טילים מונחים ברפאלעלו הדרשות והצרכים לפיתוח טכנולוגיות מתקדמות בשטח החומרים והתהליכים, כדי לאפשר את הביצועים המערכתיים הנדרשים. ראשית נזכיר את הפיתוח של סוללות תרמיות, שהן מקור האנרגיה החשמלית של רוב הטיילים הרפאליים. מוקד זה

הינו אסטרטגי, בין הבודדים בעולם⁵. בכתבה זו נציין שתי דוגמאות נוספות, שבהן היה פושקין מעורב אישית:

פיתוח טכנולוגיית פחמן-פחמן לצורך בידודים משופרים. טכנולוגיה זו משמשת את המנוע "אזוב", שהינו הדרגה השלישית של משגר הלוויינים של ישראל;

פיתוח תהליך לייצור חלונות וכיפות מאבץ גפריתי (ZnS), המאפשר שקיפות אופטית הן בתחום הנראה והן בתחום האינפרא-אדום.

פחמן/פחמן - Carbon/Carbon

פיתוח הטכנולוגיות של פחמן/פחמן החל בסוף שנות השבעים כשעלה הצורך לפתח פיות למנועים רקטיים בעלי עמידה טובה יותר מגרפיט, במשקל מופחת, באווירה של אלפי מעלות צלסיוס ומאמצי שחיקה גבוהים - תנאים הקיימים בחומרי הדף מתקדמים. פחמן/פחמן משלב בתכונותיו את החוזק של סיבי פחמן והעמידה התרמית של גרפיט. התהליך לייצורו הוא רב-שלבי וכולל קבלת שריג רב-ממדי של סיבי פחמן המאוגד במאגד פחמני. מכיוון שבתהליך הפיכת המאגד הפלסטי לפחמן חלק מהחומר (שאינו פחמן) מתאייד, נוצר מבנה נקבובי בעל תכונות מכניות ירודות. כדי לשפר את התכונות המכניות יש צורך בהספגה ובפחמון חוזרים, עד לקבלת התכונות הנדרשות. המבנה הנקבובי הוא סגור ונדרש לבצע את שלב ההחדרה של החומר הפלסטי והפחמון בטמפרטורה הגבוהה תחת לחץ של כ-1000 אטמוספרות. השילוב של הטמפרטורה הגבוהה והלחץ הגבוה דורשים ציוד מיוחד - מכשב איזוסטטי חם (Hot Isostatic Press) HIP. בסוף שנות השבעים ותחילת שנות השמונים לא הייתה קיימת בשמחוח"ת טכנולוגיית ה-HIP ולא ניתן היה לרכוש את הציוד הנדרש בחו"ל עקב מגבלות ביטחון והצורך בהצהרות לשימוש סופי.

עם הגדרת דרישות מערכת ה-HIP הן מבחינת טמפרטורות ולחצים והן מבחינת הגדלים, החלה בשמחוח"ת פעילות מו"פ אינטסיבית. השאלה המרכזית הייתה איך עונים לתנאי הייצור הקיצוניים בגדלים של עשרות סנטימטרים והפעלה בתנאי ביטחון. חישוב פשוט מצביע על צורך בעובי דופן גבוהים. גושי פלדה בגדלים אלו לא היו קיימים. נדרש פתרון יצירתי שניתן ליישם במכונות העיבוד השבבי אשר היו בישראל באותה תקופה. הפתרון שנהגה היה פשוט - ייצור המכשב ללחץ גבוה על ידי טבעות-פלדה עבות-דופן, המורכבות על מעטפת פנימית דקה לצורך אטימה. רבים ממהנדסי המכונות שעברו על עקרונות התכנון הרימו גבה והיו ספקניים לגבי האפשרות לממש את התכנון. אבל בשמחוח"ת לא נרתעו. תוך חודשיים היו כל השרטוטים



איור 2: מכשב איזוסטטי חם HIP

בבית המלאכה ותוך שנה עמד ה-HIP כחול-לבן (איור 2). אז החלה תוכנית פיתוח מואצת של החומר פחמן/פחמן, כדי ללמוד על הקשר בין תנאי התהליך לתכונות החומר. הפיתוח של שנות השמונים והוכחת ביצועי החומר המרכיב פחמן/פחמן עמדו בבסיס התכנון של מנוע שלב שני שפיתחה רפאל לטייל ה"חץ" (איור 3) וכן מנוע שלב שלישי ("אזוב") של משגר הלוויינים הישראלי.



איור 3: נחיר למנוע שלב שני של טיל "חץ"

אבץ גפריתי (ZnS)

באמצע שנות השבעים החל ברפאל מאמץ אינטנסיבי לפיתוח טיל אוויר-קרקע שלימים נודע בכינויו "פופאי". לאחת הגרסאות של טיל זה יש מערכת ביות תרמית FLIR (Forward Looking Infra Red) שדרשה חלון קדמי המאפשר מעבר קרינה בתחום אורכי הגל של האינפרא-אדום.

**שמואל
רטנר-רון
("פושקין")
ז"ל**



שמואל רטנר-רון, שהיה ידוע ברפאל ל בכינוי "פושקין", נולד בפולין ב-1922. עלה ארצה בגיל 12. תוך כדי לימודיו בתיכון התגייס לחילות השדה של ההגנה (חי"ש). בגיל 20 החל ללמוד הנדסה כימית בטכניון ובמקביל שירת בנותרות וכן התברג לבולשת הבריטית. ב-1948 התגייס לצה"ל ונמנה עם דור המייסדים של חיל המדע (חמ"ד), שממנו צמחה רפאל. למאז ועד פרישתו ב-1987 עסק בהנדסת חומרים פלסטיים, עם "פזילה" להנדסת מכונות, תוך גילוי תושיה ויצירתיות מתמידים.

פושקין היה ידוע ברפאל כמהנדס המכונות הטוב ביותר בקרב מהנדסי הכימיה (וכנראה גם מהיצירתיים בקרב מהנדסי המכונות). היה איש צנוע להפליא, לא חתר לתפקידי ניהול וליכד סביבו קבוצה של מהנדסים ומדענים שעסקו במחקר ובפיתוח של טכנולוגיות מתקדמות. על תרומותיו הרבות בתחום הטכנולוגי הוא זכה ב-1979 בפרס ברגמן היוקרתי, שהוענק לו על ידי נשיא המדינה. גם לאחר פרישתו המשיך פושקין לתרום מהידע הרב שלו כמתנדב ויועץ ברפאל.

פושקין נפטר לפני 20 שנה, ובשני העשורים האחרונים לחייו הוא תרם את שני המרכיבים המרכזיים לטכנולוגיות של פחמן/פחמן וכיפות שקופות HIP ומתקן ייצור לכיפות ZnS.

לפושקין היו יכולות מדהימות בתחום התכן המכני, חישובי החוזק, בחירת חומרי מבנה, מציאת פתרונות הנדסיים יוצאי דופן לבעיות טכנולוגיות, ומעל הכול - יכולות שרטוט ביד חופשית של רכיבים מורכבים ומסובכים ביותר. במשרדו ניתן היה לראות ערימות של ניירות. הוותיקים מספרים שכאשר נדרש היה להביא מידע על פרויקט שפושקין היה מעורב בו, הוא היה שולף מתוך הערימה את הדף הרלוונטי ללא טעות. תיוק היה ממנו והלאה...

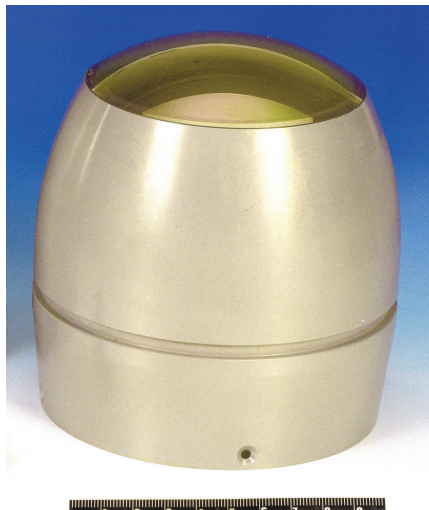
יכולותיו המיוחדות הן בהנדסה כימית והן בהנדסת מכונות איפשרו שורה של פיתוחים בין-תחומיים, שמהם ניתן לציין את פיתוח החומר המרוכב פחמן/פחמן, בו המכש האיוזוסטי הוא נקודת המפתח, ואת ייצור החומר השקוף אבץ גפריתי, בו המכש האיוזוסטי החם החומר השקוף בתחום התרמי ובתחום הנראה. פושקין הניח את היסודות, ומאז - באותה רוח ומסורת שהוא התווה - נבנו מכשבים נוספים, שתורמים לפיתוח ולייצור של מוצרים מתקדמים, מחומרים קרמיים, מתכתיים ואל-מתכתיים. מוצרים אלה מהווים את גולת הכותרת של הביטחון הלאומי. בכל האתגרים היה פושקין כזרקור באפלה - ביוזמה ובמעוף היצירתי, בתמיכה הטכנית-המדעית, בחשיבה המשותפת, ביכולת התכן, ויחד עם זאת - בענוה ובצניעות אישית.



איור 5: תבנית לייצור כיפות ZnS במתקן CVD

דרשו חשיבה יצירתית ומקורית, שהביאה את התהליך לרמת בשלות וליכולת ייצור עצמאית. הודות לכך התאפשר לרפאל ל לפתח ולייצר ראשי ביות תרמיים ודואליים למגוון טילי נ"ט כגון "גיל" (איור 6), טילי אוויר-קרקע כגון "פופאי" ופודי ניווט ומטעדים למטוסים כגון "לייטינג" ו"טופד".

להתראות בשמחות...



איור 6: ראש ביות "גיל" עם כיפת ZnS

1. אלי שבילי, "כלבי הים", רפאל שלנו, גיליון 8 (ספטמבר 2006), עמ' 24-25.
2. ראובן אשל, "הלוו" - טיל מבצעי ראשון מתוצרת רפאל", רפאל שלנו, גיליון 13 (אפריל 2009), עמ' 32-33.
3. חיים סלעי וד"ר אורי פלד, "תולדות שפירר-2", רפאל שלנו, גיליון 17 (אפריל 2011), עמ' 70-72.
4. מכתב הוקרה של פרופסור ארנסט דוד ברגמן מיום 25.1.1964 על עבודתו החלוצית של פושקין בבניית המתקן לייצור מעגלים מודפסים.
5. גיליון 1, "סוללות תרמיות", רפאל שלנו, גיליון 12 (ספטמבר 2008), עמ' 18-19.
6. מבזקי שמחות, פברואר 1993 - גיליון מיוחד ליום השלושים לפטירתו של שמואל רטנר-רון ("פושקין").



איור 4: מתקן CVD לייצור כיפות ZnS

אחד החומרים המבטיחים מבחינה אופטית ומכנית לשימוש בתחום אורכי גל אלו הינו האבץ הגפריתי או בסימולו הכימי ZnS. חומר זה פותח ויוצר בשנות השבעים על ידי חברת KODAK בשיטות של כבישת אבקות שאיפשרו קבלת חלונות ועדשות בגדלים קטנים יחסית ובצורות גיאומטריות לא מורכבות במיוחד. מאוחר יותר, ובמימון משרד ההגנה האמריקני, החלה בחברת RAYTHEON פעילות לפיתוח תהליך שיקוע כימי מפאזה גזית (או בשמו הלוועז' CVD - Chemical Vapor Deposition) לייצור חלונות מ-ZnS (איורים 4 ו-5). עיקרו של תהליך זה הינו יצירת ריאקציה כימית מבוקרת היטב בין אדים של שניים או יותר חומרים שונים כאשר תוצר הריאקציה הינו אבץ גפריתי, השקוע באופן איטי ורציף על דפנות של תבנית צורתית. כעבור מאה שעות יותר מתקבל משקע בעובי הרצוי וקרוב מאוד לצורה הגיאומטרית הסופית.

עם היווצרות הצורך בכיפה קדמית עבור טיל ה"פופאי" זוהה החומר ZnS ושיטת ייצורו מהפאזה הגזית כחומר ושיטת ייצור מובילים. עתה החלה בשמחות פעילות אינטנסיבית לפיתוח טכנולוגיית הייצור של החומר הזה באיכות אופטית ומכנית שיתאימו לשימוש המיועד.

למי שאינו בקי בטכנולוגיות וברז' הריאקציות הכימיות נראה תהליך זה כמו "קסם שחור", ובמידה רבה מאוד הוא מכונה כך גם בין אלו העוסקים במלאכה. פיתוח תהליך מורכב זה לווה בבעיות טכנולוגיות ובטיחותיות לאין ספור, שמהן נמנה רק חלק קטן: חומרי הגלם המשמשים לריאקציה הכימית הנם חומרים רעילים ביותר - בפאזה הגזית ובטמפרטורה הגבוהה הנדרשת לתהליך - חומרים אלו תוקפים כמעט כל מתכת ומפוררים אותה. בקרת התהליך (בפרט פרופיל טמפרטורה והזנת חומרי הגלם) חייבת להיות מדויקת ביותר. המינון היחסי של המגיבים לתא הריאקציה צריך להיות מדויק וקבוע לכל אורך התהליך. אלה ועוד אתגרים טכנולוגיים רבים