

מעבדת עיבוד שבבי

1. סוגי עיבוד שבבי והגדרות

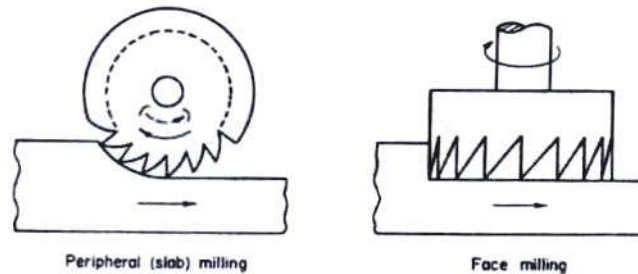
העיבוד השבבי הינו צורת עיבוד חומרי גלם לצורתם הסופית. בעיבוד שבבי, שלא כמו בעיצוב פלסטי, הקניית הצורה מתבצעת ע"י הסרה מוחלטת של חומר משטחים נתונים ע"ג העובד.

למרות אופיו הבזבזני, כביכול, תהליך זה היינו הנפוץ ביותר והפשוט ביותר להקניית צורה סופית, באיכות טיב שטח טובה, בדיוק רב וגיאומטריות מורכבות. למעשה, קרוב ל- 80% מהמוצרים עוברים, בשלב זה או אחר, צורה מסוימת של עיבוד שבבי (כמעט כל עיצוב פלסטי מחייב הסרת חומר להשלמת העיצוב). העיבוד השבבי לרוב יהווה תהליך מסדר שני לאחר עיבוד פלסטי או יציקה.

קיימים סוגים רבים של עיבוד שבבי הנבדלים באופן החיתוך (מכאני, לייזר וכו'), גיאומטריית העובד (גלילי או אחר), סוג העיבוד הנדרש (קדח, שגם וכו') ומספר רב של פרמטרים שונים.

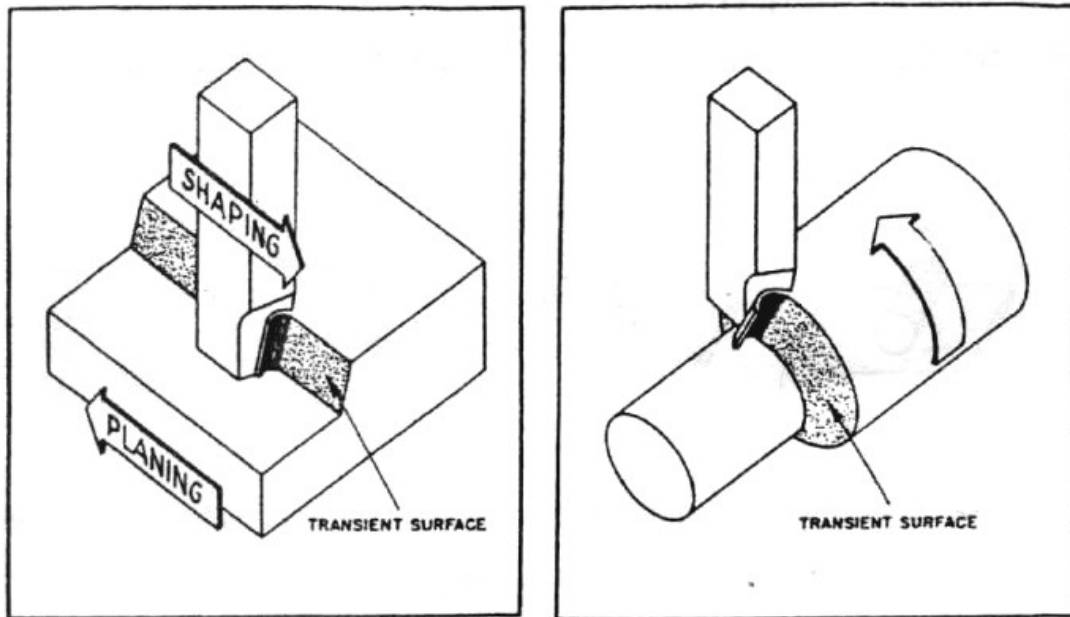
במעבדה זו נסקור 3 שיטות עיקריות המהוות את הבסיס לכל שאר הטכניקות: כרסום, חריטה וקידוח.

כרסום (Milling) – יצרת פני שטח חדשים ע"י יצירת שבבים והסרתם, באמצעות הזנת חומר גלם לסכין חיתוך מסתובבת בניצב לציר הסיבוב. לעיתים חומר הגלם מעוגן וסכין החיתוך מבצעת תנועה יחסית אליו.



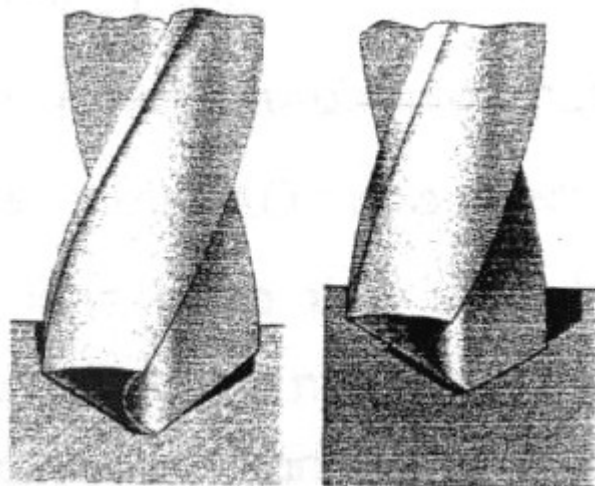
איור 1: Tool-work relationships in peripheral and face milling

חריטה (Turning) – הסרת שבבים מחומר גלם בעל חתך קוני, המסתובב במהירות גבוהה ומוזן אנכית לתוך סכין קבוע.



איור 2: Tool-work relationships in turning

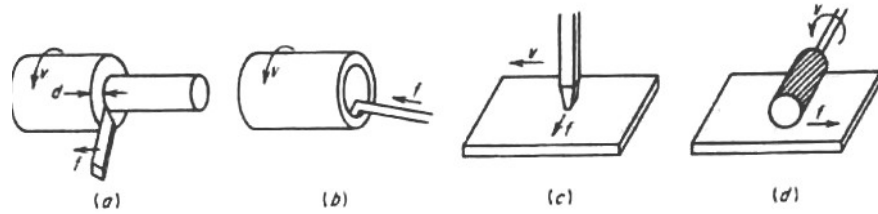
קידוח (Drilling) – יצירת חור ע"י הנעת סכין המסתובבת במהירות גבוהה לתוך חומר גלם הנמצא בניצב לכין. הסכין הינה לרוב בעלת 2 להבים לפחות.



איור 3: Effects of improper drill grinding: (left) angles of the two lips are different; (right) lengths of the lips are not equal

2. המכניקה של העיבוד השבבי

במודל פשוט של חיתוך בניצב (שיבוב דו מימדי) ע"י כלי חיתוך בעל נקי אחת ניתן לתאר את אופן יצירת השבב והפרמטרים העיקריים המשפיעים עליו.

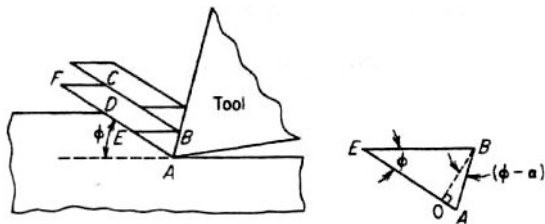


איור 4: Schematic of some common machining operations. (a) Turning on a lathe; (b) boring; (c) shaping; (d) slab milling

שבב הינו תוצר של דפורמציה גזירה מקומית היוצרת כשלון וניתוק של השבב מהעובד (חומר הגלם) לאחר המגע עם הסכין. התנועה היחסית בין העובד ובין הסכין במהלך התהליך יוצרת דחיסה של חומר באזור הסכין לאחריה גזירה מקומית. מעוות הגזירה מתרחש לאורך מישור מוגדר, מישור הגזירה, המשתרע מקצה כלי החיתוך ועד לפני שטח העובד.

בתמונה להלן נין לראות כי כלי חיתוך המתקדם במהירות V ובעל זווית כניסה α (הזווית שבין הסכין לבין האנך למישור העובד), יוצר כוח דחיסה בכיוון התקדמותו וגורם לגזירה לאורך מישור AO ובזווית Φ הנקראת זווית הגזירה.

בכך הופך חומר גלם בעל עובי t_c המחליק לאורך כלי החיתוך. התקדמות הגזירה הינה אנלוגית לחפיסת קלפים פרוסה: בכל פעם נגזר מישור אחד ונערך מעט מעל המישור הבא אחריו ובמהלך ההתקדמות נוצר חפיפה בין המישורים בדומה לערימת קלפים.



איור 5: מאמץ גזירה ממוצע בעיבוד שבבי.

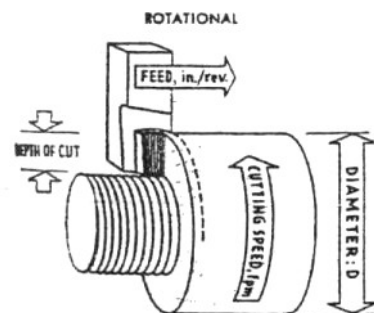
לצורה זו של הסרת חומר יש משמעויות רבות:

- מאמץ הגזירה בתהליך נדרש להיות גבוה מחוזק החומר בנק' המגע. לפיכך, תהליך זה יוצר עומס רב גם על העובד וגם על כלי החיתוך.
- התהליך יוצר עיוות של פני שטח העובד – הגזירה וההפרדה של השבבים יוצרים פני שטח גבשושיים יחסית, עובדה אותה יש לקחת בחשבון ביישומים טכנולוגיים שונים.
- במהלך התהליך נוצר חוס רב, רובו (75%) עקב אנרגיות ההפרדה וחלקו (25%) כתוצאה מחיכוך. חוס זה עשוי לגרום להתכת השבב, פגיעה בתכונות העובד ופגיעה בכלי החיתוך.

3. גורמים המשפיעים על תהליך השיבוב

3.1 תנאי השיבוב

קיימים מספר פרמטרים בסיסיים שהם בעלי השפעה כמעט בכל תהליכי העיבוד השבבי: צורת הסכין ומיקומו, מהירות חיתוך, עומק החתך והיגש (feed).



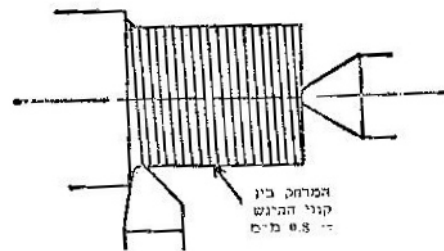
איור 6: Work-Tool motion

- מהירות חיתוך (Cutting Speed) – המהירות היחסית שבין הסכין והעובד. הואיל והמהירות יחסית אין חשיבות למי מבצע את התנועה. יבוטא ביחידות של מרחק לשניה (sps).
- עומק חיתוך (Depth of Cut) – העומק שבו קצה כלי החיתוך הבא במגע עם העובד (יחידות מרחק).
- היגש (Feed) – גודל לינארי אשר בנוסף לעומק המגדיר את שטח החיתוך, כפועל יוצא ממרווח כלי החיתוך. בכל צורת שיבוב גודל זה יוצר בצורה שונה, אך בכל השיטות גודל זה מציין את כמות החיתוך המבוצעת במעבר סכין אחד (יחידות של מרחק/מעבר סכין).

בחריטה, ההיגש שווה למרחק (מ"מ) שכלי החיתוך עובר בכיוון המקביל לציר הסיבוב של העובד, במשך סיבוב אחד של העובד. ההיגש בציור שווה ל- 0.8 מ"מ/סיבוב.

בקידוח, ההיגש שווה למרחק (מ"מ) שכלי החיתוך עובר בכיוון המקביל לציר הסיבוב של המקדח, במשך סיבוב אחד של המקדח.

בכרסום - התקדמות העובד למרחק (מ"מ) במעבר בין שן אחת לשנייה של כלי החיתוך.



איור 7: חריטה בהיגש של 0.8 מ"מ.

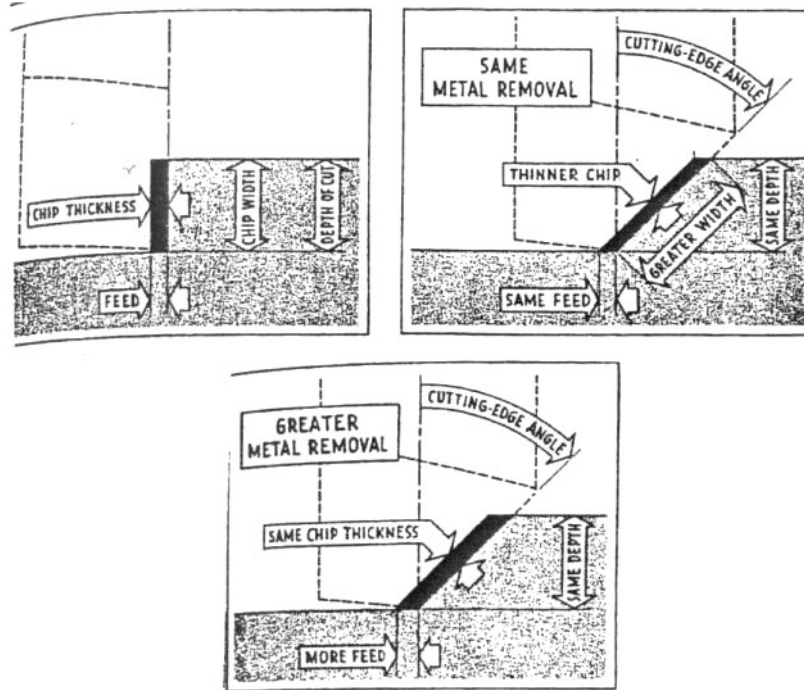
השילוב של עומק החיתוך וההיגש יוצרים את שטח החיתוך הקשור באופן ישיר ובסדר ראשון לכוח הנדרש לחיתוך. עבור כלי חיתוך בודד, הכפלת השטח במהירות יקבע את קצב הסרת נפח של חומר לשניה.

עבור שטח נתון, יחס גדול בין העומק וההיגש נותן יעילות גבוהה יותר של תהליך החיתוך ומתאפיין בגימור גבוה הואיל וסימני ההיגש צפופים יותר.

למהירות החיתוך ישנה השפעה קטנה יחסית על כוחות הסיבוב, אך ישנה השפעה מכרעת על אורך חיי כלי החיתוך.

זווית החיתוך (Rake Angle) קובעת הן את כמות החומר המוסר והן את הכוחות המושקעים.

כפי שניתן לראות בתמונה, שינוי הזווית בשילוב היגש גבוה יותר יצרו כמות חומר מוסרת גבוהה יותר למעבר אחד, אולם בשל הגדלת החלק בסכין היוצר את החיתוך וההספק הנדרש הוא גבוהה יותר.



איור 8: השינוי בעובי השבב עם זווית ה cutting-edge

4. בחירת חומרים כלי חיתוך

בחירה נבונה של סכיני החיתוך הינה אחד הגורמים למיצוי פוטנציאל השיבוב כמעט בכל היבט.

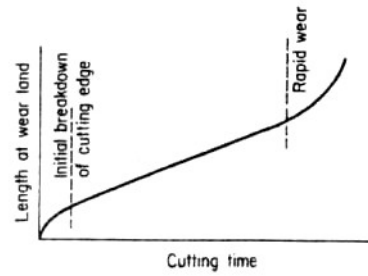
כלי החיתוך נבדלים מהחומרים שמהם הם יוצרו, כל סכין ושימושיה. להלן מספר עקרונות מנחים לבחירת כלים:

- פלדות כלים – מבוססות על פלדות פחמן עם כ-1 אחוז פחמן ולאחר טיפול תרמי מגיעות ללקושי, חסינות וחוזק מספיקים. יתרון הוא במחיר הנמוך יחסית, אולם בשל אמינות נמוכה (איבוד תכונות בטמפי גבוהה) ונחיתות תכונות לעומת הכלים האחרים הוחלפו וכמעט ולא נמצאות בשימוש.
- פלדות (High Speed Tool) – קיימים מספר סוגים פלדות HSS הנבדלים ביסודות הסגסוג העיקריים, טונגסטן, מוליבדן וקובלט ויחסי הסגסוג ביניהם. פלדות אלה משמשות בעיקר לשימושים הבאים: שיבוב נפחים גדולים במהירות נמוכה (למשל ברגים), כלי חיתוך בגיאומטריה מסובכת ובעיקר למקדחות.

- קרבידים – כלים אלה מיוצרים בסינטור מאבקות ונפוצים בעיקר כלי טונגסטן קרביד עם קובלט המשמש כמקשר בשיעור של 5-13 אחוז. קיימים כלים העשויים מיקרומבנה מעודן מאוד היוצרים סבילות שבר גבוהה ואורך חיים ארוך יותר לכלים קיימות סגסוגות שבהם נעשה שימוש בטיטניום טנטלום וקולומביום במקום הטונגסטן. כלים אלה מצטיינים בקושי גבוה מאוד (כ- $R_c 93$) ועומדים במהירויות שיבוב שלפי 200 עד 500 מ-HSS. בנוסף לכך נעשה שימוש נרחב בציפוי כלים בשכבות דקות של טיטניום קרביד או טיטניום ניטריד לשיפור העמידות בשחיקה או הסיכוך. כיום כלים אלה הם הנפוצים ביותר כמעט לכל שימוש בתעשייה.
- קרמיקה – מבוססים ברובם על אלומינה או צרמטים מבוססי אלומינה. כלים אלה מצטיינים במהירויות שיבוב גבוהות במיוחד (פי 3 מקרבידים), אורך חיים ארוך יותר, אינם דורשים קירור ומאפשרים גימור גבוה של פני השטח. למרות יתרונם, כלים אלה משמשים ליישומים מיוחדים ולא נמצאים בתפוצה נרחבת בשל המורכבות הטכנולוגית שבשימוש בהם.
- יהלום – החומר הקשה ביותר משמש ככלי חיתוך מצויין בעל דיוק גבוה ומהירויות חיתוך הגבוהות ביותר. בשל מחירם, כלים אלה משמשים ליישומים מיוחדים בלבד.

בשל השימוש הרציף בכלים, עשויה להתרחש ירידה בתכונות הכלים מה שעלול לגרום לירידה בדיוק השיבוב, חספוס פני השטח, השקעת עודף כוח שבירת כלים או כל הגורמים יחדיו. הזמן לפני הכשלון מוגדר כאורך חיים של כלי החיתוך (לרוב יבוטא בדקות). כשלון של כלי יגרום להחלפתו והשחזתו מה שגוזל זמן שיבוב ועלות בהתאם.

בתמונה להלן ניתן לראות גרף שחיקה אופייני המתאר את התקצרות קצה נק' המגע כפוני של זמן העבודה. ניתן לראות כי בשלב I ישנה שבירה של החוד ויצירת מישור שחיקה. לאחר מכן בשלב II קיימת שחיקה לינארית של הסכין. בשלב III מתרחשת שחיקה מוגברת.



איור 9: עקומת שחיקה אופיינית לכלי חיתוך

הגורם המרכזי בקביעת אורך חיי הכלים הוא מהירות החיתוך, כפי שבא לידי ביטוי בנוסחא:

$$Vt^n = \text{const}$$

כאשר V מהירות השיבוב, t אורך חיי הכלי ו- n הוא קבוע האופייני לחומר ממנו עשוי הכלי (0.1 ל- HSS, 0.2 לקרבידים ו- 0.4 לקרמיקות).

5. נוזלי חיתוך

נוזלי חיתוך מגדילים את היעילות ומקטינים עלויות בכך שהם מאפשרים שימוש במהירויות שיבוב גבוהות, הישגים גבוהים ועומקי שיבוב עמוקים יותר. כמו-כן הנוזלים משפיעים גם על אורך חיי הכלי החיתוך, דיוק פני השטח, ומפחיתים את ההספק הנדרש לעובדה נתונה.

התפקידים העיקריים של נוזלי החיתוך הם:

- קירור הסכין, העובד והשבב.
- סיכוך והפחתת החיכוך.
- סיוע בפינוי חומר שהוסר.
- הגנה בפני קורוזיה
- בקרה על הוצרות BUE – Build Up Edge.

קיימים סוגים רבים של נוזלים על בסיס שמנים אורגניים, מים וגזים.

6. השפעת תכונות חומר העובד

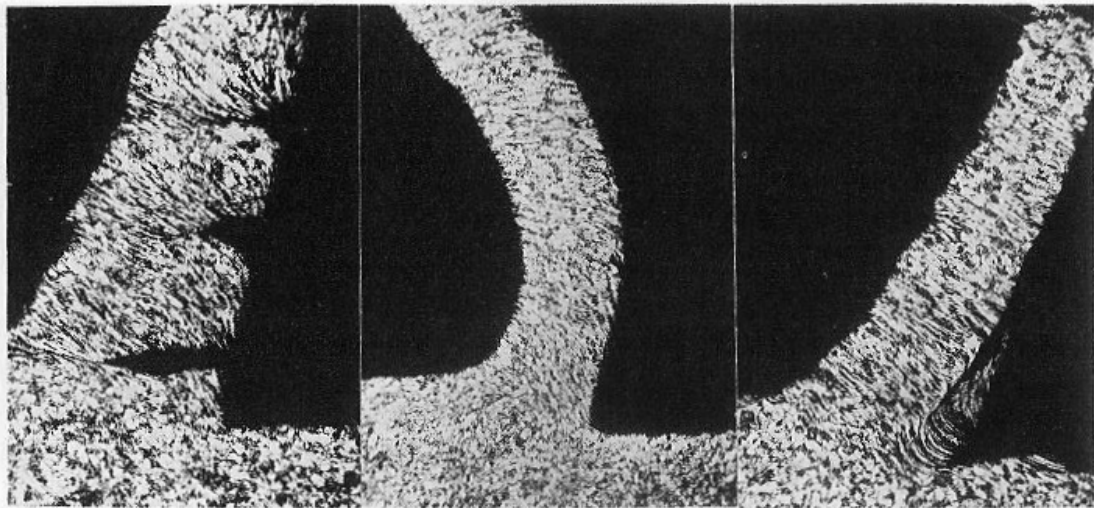
לתכונות החומר ממנו עשוי העובד ישנם השפעות על אופן השיבוב בהיבט מהירות השיבוב, הכוח וכו'. לדוגמא, לשיבוב חומר בחוזק גבוה ידרשו כוחות חזקים ולפיכך הספק רב יותר, טמפ' גבוהה יותר הפסדי חיכוך ועוד.

התכונות העיקריות המשפיעות על כושר העיבוד הן: משיכות (Ductility), חוזק לגזירה, קושי, הקשיית מעוותים ומקדם החיכוך.

למשיכות יש את התפקיד העיקרי בהשפעה על השיבוב. חומרים בעלי משיכות גבוהה מאפשרים דפורמציה פלסטית רבה של השבב לפני הסרתו, אשר מגדילים את העבודה המושקעת והחום הנוצר. בנוסף לכך, נוצר שבב רציף הנשאר במגע עם הכלי זמן רב ויוצר חום נוסף עקב החיכוך הנוצר. לעומתם, חומרים פריכים נגזרים במישור הגזירה באופן פריך מה מיותר פני שטח מחוספסים ושבבים לא רציפים ושבורים.

תופעה נוספת הקשורה במשיכות היינה היווצרות קצה, (Edge Build Up – BUE) הנוצרת בחומרים משיכים. הטמפ' המקומית הגבוהה והלחץ הגבוה המופעלים על קצה הכלי גורמים להצטברות של חומר וריתוכו לסכין החיתוך. תופעה זו גורמת לטיב פני שטח לא אחיד וגרוע. לרוב ניתן למנוע מצב זה ע"י שימוש בעומקי חיתוך קטנים יותר או מהירות גבוהה.

איור 10 מתאר את שלושת צורות האופייניות של השבבים.



איור 10: צורות האופייניות של השבבים (משמאל לימין): שבב פריך, שבב משיך, ושבב משיך עם היווצרות קצה (Build Up Edge).

7. השפעת המיקרומבנה על כושר העיבוד

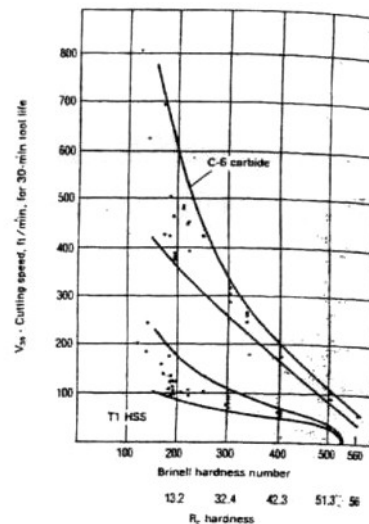
- **יציקות ברזל** – למיקרומבנה של יציקות הברזל ישנה השפעה על אורך חיי כלי השיבוב ולפיכך ע"פ המיקרומבנה תיקבע מהירות החיתוך. קיימת התאמה טובה בין כושר השיבוב של הפלדות לעומת הקושי שלהן: פלדות בעלות ערכי קושי נמוכים יותר מאפשרות שיבוב במהירות גבוהה יותר.

Table 2. Turning cast irons with C-2 carbide
Cutting speed, ft/min, for 30-min tool life = V_{30} .

Material	Matrix microstructure	Type of graphite	BHN	V_{30}	UTS, psi	YP, psi	Elong., %
Gray Iron	100% ferrite	Flake	100	880	15 700
	Coarse pearlite	Flake	195	360	35 000
	Fine pearlite	Flake	225	340	45 000
Ductile Iron	Acicular	Flake	263	200	59 000
	100% ferrite	Spheroidal	170	810	70 000	56 000	22
	97% ferrite, 3% pearlite	Spheroidal	183	570	77 000	62 000	20
	60% ferrite, 40% pearlite	Spheroidal	207	430	84 700	69 800	17
Ferritic malleable, ASTM 32510	60% ferrite, 40% pearlite	Spheroidal	215	360	93 000	72 000	4
	20% ferrite, 80% pearlite	Spheroidal	265	240	97 250	79 000	2
	100% ferrite	Temper carbon	109	950	50 000	32 500	10
Pearlitic malleable:	ASTM 48004	Temper carbon	179	450	70 000	48 000	4
	ASTM 60003	Temper carbon	230	280	80 000	60 000	3
	ASTM 80002	Temper carbon	250	260	100 000	80 000	2

מיקרו מבנה המכיל קרבידים ירום לשחיקה מוגברת של הכלים, ולכן פלדות המיועדות לשיבוב יתאפיינו באחוז קרבידים נמוך יותר.

- **פלדות** – כמו היצקות, גם בפלדות ישנה חשיבות למיקרומבנה וניתן התאמה בין אורך חיי הכלים לעומת קושי חומר הגלם.



איור 11: V_{30} versus hardness in turning wrought steels

ככלל, אורך חיי הכלים עולה ככל שריכוז הפריט (ferrit) עולה בפלדות מורפות. תוספות של סולפיד או עופרת משפרים את יכולת השיבוב על חשבון התכונות המכניות.

פלדות חוזק על בעלות שיעור פרליט גבוה (70-100 אחוז) מתאפיינות בשחיקת כלים מוגברת.

- **נתכי אלומיניום** – רוב נתכי אלומיניום קלים לעיבוד וניתנים לעיבוד שביבי במהירויות גבוהות מאוד, מאחר ומדובר בנתכים רכים יחסית, לכן אורך חיי כלי החיתוך איננו גורם מגביל משמעותי. בכל זאת, ישנם נתכי אלומיניום יוצאי דופן, כגון: נתכים מסוגסגים בכמות גבוהה של סיליקון (נתך Si – 380 – 8.5% ונתך Si – 390 – 17%). במקרומבנה של נתכים אלו סיליקון מופיע בצורת מחטים וגורם לשחיקת כלי החיתוך. למניעת תופעה הנ"ל ולעידון המיקרומבנה, הנתך מוסגסג ביסוד מייצב כגון ברזל ב- 0.85% ומטופל בנתרן ע"מ לשבור את מחטי הסיליקון לחלקים קטנים עדינים יותר.

ביבליוגרפיה

1. Metals Handbook, Volume 16, "**Machining**" from page 1-27.
2. Dieter G. G., in **Mechanical Metallurgy**, Third Edition McGraw – Hill publishing co. inc. 1986, from page 679.
3. DeGarmo. E.P., in **Materials & Processes in Manufacturing** Fourth Edition, Macmillan publishing co., Inc., New York, 1974, from page 458.

4. ו.א.ג'. צ'פמן, הטכנולוגיה של המתכות, ע"מ 147-149, 241.