

TRN 7700801



THIS DOCUMENT
TRN 7700801



מתקן EDM^(*) למעבדות ולבתי מלאכה

מ' לנקסנר, א' ברקו, נ' רוך

נובמבר 1976

(English title and abstract included)

תקציר

מיצג פיתוח של מתקן EDM^(*) פשוט לעיבודים מיוחדים במעבדות ובבתי מלאכה הכולל גנרטור RC, מערכת-סרוו אלקטרומכנית ומערכות למיקום העובר והכלי וליצירת תווך העבודה המתאים (נוזל דיאלקטרי).

EDM = Electric Discharge Machining^(*)

NRCN(TN)-010

(text in Hebrew)

ELECTRIC DISCHARGE MACHINING DEVICE FOR LABORATORIES AND WORKSHOPS

Michael LANXNER, Arie BERKO, and Nahum RON

November 1976

ABSTRACT

A simple low power electric discharge machining (EDM) device for special uses in laboratories and workshops is presented. The device includes an RC generator, an electromechanical servo 3-axis work-tool alignment system and a closed dielectric fluid circulation loop.

<u>עמוד</u>	<u>תוכן הענינים</u>
1	1 מביא ל-EDM
1	1.1 כללי
3	1.2 פירוט ההתרחשויות באזור הניצוץ ימרכיבו
4	1.3 מרכיבי מתקן ה-EDM
7	1.4 תלות בחכינות פיסיקליות של עיבור ב-EDM
8	1.5 תלות בפרמטרים החשמליים
10	1.6 מטלורגיה של אזור העיבור
11	1.7 איפיון כיצועי מכשירי EDM
12	1.8 שימושים במכשירי EDM
12	1.9 אביזרים
13	1.10 עתיר ותחזיות
14	2 מתקן EDM
14	2.1 מניעים לפיתוח מתקן EDM במעברה המטלורגית (קמ"ג)
15	2.2 חלקי המתקן
18	2.3 אביזרים
18	2.4 תוצאות ומסקנות
20	3 דיגמאות לניצול מתקן ה-EDM במעכדה המטלורגית
20	3.1 חיתוכים בחומר תרמואלקטרי
21	3.2 הדקת רגמים למיקרוסקופיה אלקטרונית
21	3.3 הצרה למוטית טיטניום
22	4 סיכים
23	5 סימוכין

1.1 כללי

1.1.1 תאיר התיפעה

העיקרון של EDM (Electric Discharge Machining) ידוע זה עשרות שנים. ב-EDM משמשים ניצוצות להסרת חימר באופן מבוקר מעיבוד (work), בעל מוליכות חשמלית, הטבול בנוזל ריאלקטרי. הניצוצות נוצרים על ידי פולסים של אנרגיה חשמלית. פולסים אלה פולטים כמויות זעירות של חימר העיבוד הקרוב ביותר לכלי המעבד (tool). בסופו של דבר מאבד העיבוד נפח שטח החתך שלי (אי שטח הפנים שלו) שווה לשטח המעבד המשתחף ביצירת הניצוצות. מערך העיבוד ב-EDM נראה כצוור 1.

1.1.2 מקום ה-EDM במסגרת הכללית והשוואה לשיטות אחרות

בין יתר השיטות הלא קונבנציונליות ישפוחמי בעיקר בעת האחרונה ניתן למנות את (1)

ECM = Electro-Chemical Machining

ECG = Electro-Chemical Grinding

ECDG (ECDM) = Electro-Chemical Discharge Grinding (Machining)

ECH = Electro-Chemical Honing

PAM = Plasma Arc Machining

EBM = Electron Beam Machining

LBM = Laser Beam Machining

EDM = Electric Discharge Machining

EDG = Electric Discharge Grinding

את ה-EDM מייחדים היתרונות הבאים (ביחס לשיטות הקונבנציונליות, בעיקר):

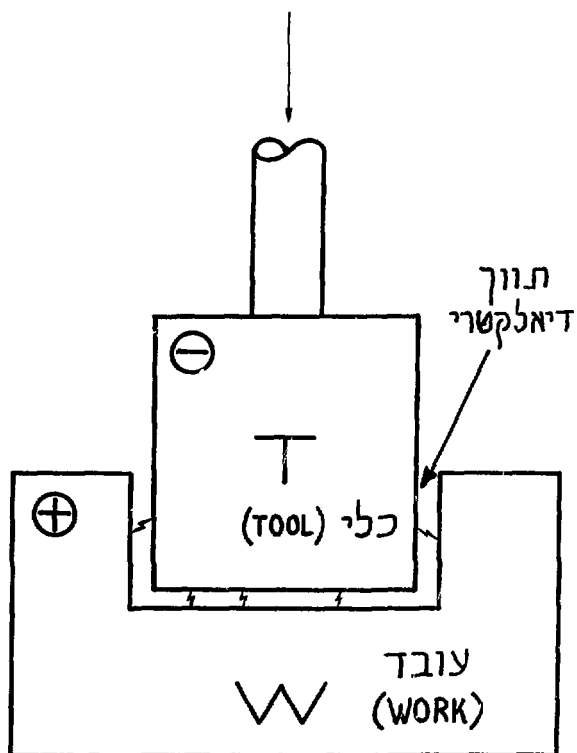
(א) היעדר מגע מכני בין כלי העיבוד לעיבוד.

(ב) עיבוד צורות מיוחדות (פירוט בטעיף 1.8).

(ג) עיבוד חומרים קשים או פריכים.

(ד) עימק נזק קטן לעיבוד ($40 \mu\text{m}$).

(ה) קל יותר לשליטה מרחוק.



ציור 1 סידור האלקטרודות במתקן EDM.

(במקרים רבים נעשה העיבוד בקוטביות הפוכה מזאת שבציור).

ל-EDM מיגבלות אופייניות:

- (א) מיגבל לוחמרים בעלי מוליכות חשמלית (מעל למינימום מסויים).
 (ב) קצב עיבוד נמוך יחסית (ת₃/min ~7000 מכסימום)⁽²⁾.
 (ג) יש להתחשב הרבה בכלאי הכלי המעבד.

1.1.3 היסטוריה

להלן כמה ציוני דרך בהיסטוריה של ה-EDM:

- (א) 1768 - Joseph Priestly גילה התבלות של מגעים חשמליים כתוצאה מניציות.
 (ב) 1800 - ההתפרקות מנוצלות ליצירת אבקה מתכתית.
 (ג) 1936 - B.R. & N.I. Lazarenko השתמשו באפקט הנ"ל להסרה מבוקרת של חומר מתכתי (חילוץ מקדחים ומברזים שנתקעו).

כיום קיימים מכשירים מגוונים המנצלים את התופעה, החל ממכשירים לעיבודים עדינים ביותר וכלה במתקני ענק להסרת אלפי מ"מ³ לרקה.

1.2 פרוט ההתרחשויות באזור הניצוץ ומרכיביו

1.2.1 תיוך יסודי ההתרחשויות

המעורבים הישירים בהתרחשות הניצוץ הם: האנודה, הקתודה, והתווך הדיאלקטרי. כאשר המתח בין האנודה לקתודה עובר את מתח ה-*flash-over* של התווך הדיאלקטרי מתפרק המתח בהתגברו על ה-*insulation-resistance* של הנוזל הדיאלקטרי. התפרקות זו ניתן לחלק לארבעה פרקי זמן:

- (א) התפרקות ראשונית - זרם דליפה קטן המתחיל את הניצוץ.
 (ב) התפרקות ניצוץ - זרם גבוה המתכבט במפל אלקטרוני הגורם ליוניזציה של גז בטמפרטורה גבוהה ביותר (K 12000-8000) ובלחץ של כמה מאות אטמוספירות.
 (א) פליטה של חומר מאיכל כתוצאה מפגיעת מפל האלקטרונים וירידה פתאומית של לחץ הגז מהפסקת הפולס.
 (ד) הפצצת הקתודה ביונים חיוביים, בעיקר בצורת קשת.

1.2.2 מכניזם

ניתן ליחס שלושה מכניזמים לסילוק החומר מהאנודה⁽²⁾:

(א) מכניזם תרמי, ניצוץ-evaporation.

(ב) מכניזם אלקטרו-כימי, זרם גבוה ביותר ($\sim 72000 \text{ A/cm}^2$) הגורם לדחייה אלקטרוסטטית

הגדולה מה-yield-point של החומר

(ג) מכניזם תרמי-מכני, נדויף ופליטה כניזל בשל שינוי פחאמי בלחץ.

1.3 מרכיבי מתקן ה-EDM

מתקן EDM מורכב מארבע יחידות עיקריות: גנרטור ליצירת התפרקות, מערכת טרוו לשמירת המרחק הבינאלקטרודי, מערכת מכנית למיקום העובר והכלי ומערכת הניזול הדיאלקטרי להספקת התווך הדרוש ליצירת ההתפרקות.

1.3.1 הגנרטור

תפקיד הגנרטור

(א) לספק את המחח הדרוש להצתת הניצוץ ולהחזקתו.

(ב) לקבוע את עוצמת זרם הניצוץ.

(ג) לקבוע את משך קיום ההתפרקות.

(ד) לקבוע את תדירות ההתפרקות.

סיגני הגנרטורים הקיימים מפורטים בזה:

(א) גנרטור RC או גנרטור לזרנקו (Lazarenko).

בגנרטור זה מחקבלות ההתפרקות על ידי טעינה ופריקה של קבל. ניתן לשכלל את המעגל הבסיסי על ידי הוספת סליל השראה, דיודה וכו'.

יתרונות פשוטות (מחיר נמוך) ואפשרויות בעיבודים עדינים (microfinish).

חסרונות: תלות הרדית בין הפרמטרים - זרם, משך ההתפרקות והאנרגיה;

תנודות לא רצויות בסיום כל התפרקות; קצבי עיבוד נמוכים ואיכול כלי גבוה.

(ב) גנרטור פולסים אלקטרוני

הפולסים מוקבלים על ידי מיתוג אלקטרוני באמצעות טרנזיסטורים או מפסקים אלקטרוניים אחרים (SCR, TRIAC וכו').

יתרונות: שליטה כנפרד על כל אחד מהפרמטרים החשמליים, ומיגוון רחב של תנאי עבודה כתוצאה מכך; קצבי עיבוד גבוהים; אפשרות לבלאי אלקטרודה נמוך.

חסרונות: בעיבודים עדינים התוצאות פחות טובות משל גנרטור RC.

(ג) גנרטור פולסים מכני (rotary impulse generator)

הפולסים מתקבלים על ידי סגירה ופתיחה מכניים של מעגל המתח הבין-אלקטרודי. יתרונות: קצבי עיבוד גבוהים.

חסרונות: פני שטח גרועים בעיקר בשל עיבוד מלווה בהרכה קשתות (arcs).

סיכום סוגי הגנרטורים הקיימים מובא בצירור 2.

1.3.2 מערכת הסרוו (servo)

קיימים שני סוגים של מערכות-סרוו.

(א) סרוו אלקטרו-מכני (electromechanical-servo):

בסרוו זה מבוקר המרווח הבין-אלקטרודי על ידי מנוע המשולב לכלי.

יתרונות: פשטות בפיקוח.

חסרונות: בעיות בזמני תגובה קצרים ושחיקת הרכיבים המכניים.

(ב) סרוו הידראולי (hydraulic-servo):

בסרוו זה מבוקר המירווח הבין-אלקטרודי על ידי מערכת הידראולית.

יתרונות: (א) מיגוון רחב יותר של הפעלה (כלי רוטט, קופץ וכד').

(ב) אפשרות עבודה בכלים כבדים ללא שחיקת חלקים.

חסרונות: מחיר גבוה כתוצאה מתוספת מערכות (שמן וכו').

1.3.3 המערכת המכנית

המערכת המכנית כוללת:

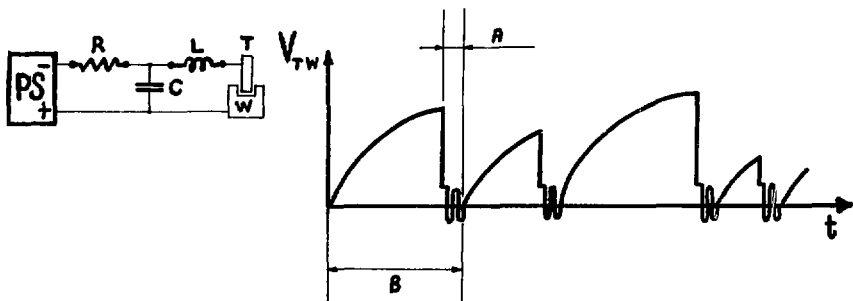
(א) מערכת x-y-z להכאת העובד למצב עיבוד התחלתי.

(ב) מערכת להזזת הדגם תוך כרי עיבוד.

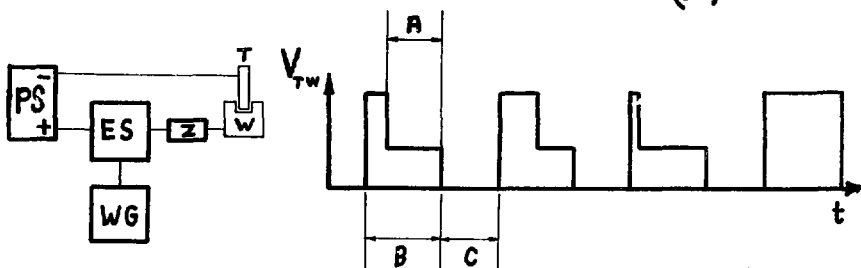
ניתן, כמוכון, לשלב את שתי המערכות הנ"ל למערכת אחת, בתנאי שהראשונה תהיה בעלת התכונות

הנוספות הנדושות מהשניה (כיטול אפיציות בעת החלפת כיוון ואפשרות עבודה ידנית ואוטומטית כא

(א)



(ב)



ציור 2 צורת הגל V_{TW} של שניים מהגנרטורים הנפוצים ביותר (כאשר B הוא זמן הפעלת המתח ו-C זמן הפסקת המתח; A הוא זמן העיבוד).

(א) גנרטור RC (או RLC כאשר L איננו השראות פרזיטיבית בלבד) הכולל ספק DC (PS) ורשת RLC.

(ב) גנרטור פולסים הכולל ספק DC (PS), מפסק אלקטרוני (ES), מחולל גלים (WG) ועומס נוסף (Z). במקרה ש-A, האיזור בו מתבצע העיבוד, ניתן לקבועה, מוגדר הגנרטור כמונו-אנרגטי.

1.3.4 המערכת הדיאלקטרית

העיבוד ב-EDM נעשה בנוזל דיאלקטרי. מבחינה חשמלית נמצא נוזל זה בין הגזים לכינ האלקטרווליטים החלשים. נוזלים המתאימים ל-EDM משתייכים לקבוצות.

hydrocarbons
silicon fluids
water
alcohols
liquid nitrogen and argon

חלקי המערכת הדיאלקטרית הם:

(א) משאבה לסיחור הנוזל

(ב) צנרת ומערכת ברזים.

(ג) מסננים לסינון חלקי מתכת ($5 \pm 25 \mu\text{m}$).

1.4 תלות בתכונות פיסקליות של עיבוד כ-EDM

1.4.1 תכונות חשמיות וחשמליות

הגידול הקובע בעיבוד כ-EDM הוא האנרגיה המינימלית הדרושה לנידוף חלקיקי העובד W_v (J/g).

בהנחה שאין איבורי אנרגיה ניתן לסכם ערך זה בביטוי (3):

$$W_v \text{ (J/g)} \propto \int_T^{T_m} C_s dt + L_f + \int_{T_m}^{T_b} C_\lambda dt + L_v$$

L_f - חום היתוך

L_v - חום איור

T_m - טמפרטורת היתוך

T_b - טמפרטורת דתיחה

C_s - חום סגולי במצב מוצק

C_λ - חום סגולי במצב נוזלי

השפעת הפרמטרים הנ"ל (ינוספים) היא בדרך כלל לפי הסדר הבא (הראשון בעל ההשפעה הגרולה ביותר).

(א) חים היתוך וחום איור.

(ב) חים סגיל

(ג) מיליכות חים ומוליכות חשמלית.

(ד) צפיפות, קשיות, חוזק ואנרגית הקוהזיה.

אחי מהביטויים האמניריים לחישיב קצב סילוק החומר הוא:

$$V = \beta E_C^{-1} T_m^{-2}$$

V קצב סילוק חומר -

E_C - אנרגית קוהזיה

β - תנאים חשמליים (גנרטור, נוזל וכו')

ניתן גם לערוך את החומרים השכיחים בעיבורי EDM לפי סדר עולה של קצב סילוק החומר (3):

W, Ta, Mo, Nb, V, Cr, Ti, Ni, Fe, Mg, Zn

כסירה זו Zn הוא בעל קצב הסילוק הגבוה ביותר.

1 4.2 תכנוני מכניות ומכנה החומר

אחר היתרונות בעיבור ב-EDM הוא שתכונותיו המכניות של החומר הן בעלות השפעה מיעטה על אפשרית עיבורו ב-EDM. הגורם המשפיע במקרה זה הוא כפי שראינו, אנרגית הקוהזיה.

1 5 תלות בפרמטרים החשמליים

1 5.1 מתח ואנרגיית ההתפרקות

בגנרטי RC נקבעת אנרגית ההתפרקות על ידי מתח הטעינה והקיבול:

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

בגנרטורים אחרים האנרגיה נקבעת על ידי משך הפולס וסוג האלקטרודה (מתכת או גרפיט).

מתח העכירה נע בהתאם לכך בין 15 ל-25 וולט.

אניגית ההתפרקות ניתנת במקרה הכללי על ידי הקשר:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} V(t) \cdot I(t) dt$$

התחלת ההתפרקות	t_1
סיום ההתפרקות	t_2
ערך רגעי של המתח	$V(t)$
ערך רגעי של הזרם	$I(t)$

דוגמה אופיינית לתלות כפרמטרים הנ"ל הוא הביטוי האמפירי לקצב סילוק החומר בגנרטור גל מרובע⁽⁴⁾,

$$MRR = 6.57 \times 10^{-3} \times I_p^{0.289} \times I_{av} \times t^{0.026}$$

MRR קצב סילוק החומר (Metal Removal Rate)

I_p זרם השיא

t אורך הפולס

I_{av} זרם ממוצע

גם צורת הפולס (פולס ריבועי, משולש וכו') משפיעה על העיבוד ב-EDM.

1.5.2 מירווח הפריצה

בגנרטור RC ישנה תלות הדדית בין מחח ההתפרקות לבין מירווח הפריצה (discharge gap).

כללית, ככל שהמירווח גדול יותר פני השטח גרועים יותר. מאידך, מירווח גדול יותר

מאפשר ניקוז אזור העיבוד בצורה יעילה יותר. כמו כן, מירווח גדול יותר מאפשר

לעבוד במחחי פריצה גבוהים יותר, כלומר: אנרגיות גבוהות יותר. גודלו של המירווח

נע בין 25 ל-250 מיקרון. במקרים מיוחדים ניתן להקטין מירווח זה למיקרונים בידרטים.

1.5.3 מקרם דיאלקטרי

המקרם הדיאלקטרי של הפחמימנים (hydrocarbons) הוא 1.5+2. השרה הקריטי בנוזלים אלה

נע בגבולות 11×10^5 V/m. חשוב במיוחד הוא הזמן הדרוש לנוזל לחזור למצבו הראשון

אחרי שהתייבשה בו ההתפרקות. ככל שיקצר זמן זה כך יגדל שיעור ההספק (או צפיפות הזרם)

בו ניהר לעבוד בנוזל.

1.5.4 צירת הפילם

כבר נזכר ענין ההשפעה שיש לצירת הפולס על העיבוד. בפולסים ריביעיים ניתן להגיע לקצב סילוק החימר הגבוה ביותר, במיוחד כשרואגים לפולסים מונו-אנרגטיים מאריך בפולסים חצי-סיניוסיאידליים נגרם נזק קטן יותר לאזור הקרוב לפני החומר. ירוע גם שפולסים רמויי שן מסור מאפשרים קבלת פני שטח חלקים ביותר⁽²⁾.

1.6 מטלורגיה של אזור העיבוד

1.6.1 פני השטח

בעקבות כל התפרקות נוצר לוע שפניו כרוויים וסביבו טבעת בעלת פנים גליות. לועות הקתודה קטנים ברור כלל מלועות האנודה. קוטר הלועות על האנודה נע בין $200 \mu\text{m}$ ל- $500 \mu\text{m}$, יעומקם $6-25 \mu\text{m}$. על פני השטח ניתן להבחין ב-cross-deposition, כלומר: ציפוי של חומר הקתודה על האנודה ולהיפך, בעיקר על הטבעות הנזברות. תופעות אלו מיכרות עבור הצמדים⁽³⁾ Fe-Al, Fe-Cu, Zn-Fe, Fe-Zn.

1.6.2 שכבות תת-משטחיות

באזור העיבוד מצויות שכבות תת-משטחיות שונות⁽²⁾:

(א) השכבה שעל פני השטח נקראת melted layer או resolidification-zone. באזור זה

הכל צפוי והרכבו עשוי להשתנות באופן קיצוני. עומקה של שכבה זו נע בין $1 \mu\text{m}$ ל- $5 \mu\text{m}$ והיא קשה במיוחד (hard-skin).

(ב) לאחר מכן באה שכבה בה הרכב החומר השתנה כתוצאה מהחימום (ואולי התכה). שכבה זו מוגדרת כ-chemically affected zone.

(ג) השכבה הבאה היא ה-macrostrained zone; שם ניתן להבחין במיקרו-סדקים, שינויי פאזה, twins, ו-slips. עוביה כ- $15 \mu\text{m}$.

(ד) השכבה האחרונה היא ה-microstrained zone. שכבה זו מאופיינת בעיקר על ידי צפיפות גבוהה יותר של דיסלוקציות. עוביה עשוי להגיע בחומרים חד-גבישיים ל- $1 \mu\text{m}$, אך ברור כלל מגיעה שכבה זו לעובי של $20-40 \mu\text{m}$.

1.7 איפיון ביצועי מכשירי EDM

1.7.1 קצב סילוק החומר (MRR)

MRR, קצב סילוק החומר מהעובר (mm^3/min or inch^3/hr), הוא הגודל החשוב ביותר במכשירים התעשייתיים. ערכו מגיע לכ- $7000 \text{ mm}^3/\text{min}$ במכשירים גדולים. לצורך חשיב ערך זה יש להשתמש בנוסחות אמפיריות שתחום שימושן מוגבל ביותר. בניסחית אלה, הזרם, משך הפולס ותכונות החומר משמשים בעירוביה.

1.7.2 יעילות ואיכול האלקטרודה

גודל חשוב לא פחות הוא קצב הבלאי של הכלי (TWR-tool wear rate). העיבוד יהיה רווחי יותר ומדויק יותר ככל שבלאי הכלי יהיה קטן יותר. הגורמים המשפיעים במקרה זה הם: מוליכות החום, טמפרטורת ההיתוך, עוצמת הפולס ואורכו. אחת הניסוחות האמפיריות לקצב הבלאי הן (4):

$$\text{TWR}/I_{av} = \delta^{0.15} [A + B \ln(I_p) + C \ln(\tau)]$$

δ המרווח בין הפולסים

I_p זרם השיא

τ אורך הפולס

A, B, C קבועים אופייניים לחומר.

1.7.3 פני שטח ודיוק

ליעות הפריצה גורמים לפני שטח גללים. ניתן להגיע בעוצמות ניצוץ נמוכות ל- peak-to-valley distance של $1 \mu\text{m}$. דיוק העיבוד נקבע על ידי פני השטח ועל ידי בלאי הכלי. ישנם מצבי אפס בלאי (no wear) (4) אך קצבי האיכול כתנאים אלה נמוכים ביותר.

1.7.4 מיגבלות

בעיבירי EDM יש לקחת בחשכון את המיגבלות הבאות:

(א) מוליכות חשמלית מינימלית - החומרים; פרט למתכות, שניתן לעבד ב- EDM הם (2):

graphites, borides, carbides, cermets, sulfides וחומרים מוליכים למחצה שונים.

(ב) זיק לחומר (בעיקר כחד-גביש) בחומרים מסוימים (5).

1.8 שימושים במכשירי EDM

1.8.1 שימושים קונבנציונליים

- (א) ייצור תבניות (יציקה, חיתוך וכד').
 (ב) חילוץ מקרחים ומכרזים שנחקעו.
 (ג) עיבוד חומרים רעילים ורדיואקטיביים.
 (ד) קויחת חורים קטנים ועמוקים.
 (ה) קויחת חורים לא עגולים
 (ו) עיבוד חלקים מחומרים שברים.

1.8.2 שימושים כמעבודת

- (א) חיתוך ועיבוד גבישים (מחכתיים).
 (ב) עיבוד חומרים רב-פאזילים.
 (ג) הכנת דגמים רקים (בעובי $100 \mu\text{m}$ ~).
 (ד) יצירת אבקות אולטרה-עדינות (גודל חלקיקים אופיני $200+500 \text{ \AA}$).

1.9 אביזרים

1.9.1 כלים רגילים

כלים ל-EDM ניתן להכין ממיגוון רב של חומרים. להלן העיקריים שבהם⁽²⁾:

Cu (א)

(b) Cu-W (sintered)

(ג) Ag-W (sintered)

(ד) ציפוי נחושת על צורות פלסטיק

(ה) Ta

(ו) W

(ז) Al (להספקים גבוהים)

(ח) Zn-Sn (אלקטרודות צורתיות)

(ט) גרפיט (pressed & bulk)

בחירת החימו נקבעת על-ידי צורת הכלי הדרוש, קצבי האיכול והמחיר.

1.9.2 כלים נעים

בסעיף הקודם דובר בכלים נחים. ניתן לשפר את תנאי העיבוד ובעיקר את קצב ניקוז הגרגרים מאזור החיתוך על ידי הנעת האלקטרודה. להלן כמה דוגמות:

(א) כלי חוט נוסע - לחיתוך פרוסות.

(ב) כלי מיט מסתייב - לקריחת חורים

(הערה: הסיבוב יכול להתבצע גם סביב ציר הנמצא מחוץ לגוף הכלי).

(ג) עובר נע וכלי נח ברומה לשיטת המחרטה.

(ד) כלי בתנועה ספירלית - למסלולים חלזוניים.

(ה) כלי דיסקה מסתובבת - לחיתוך פרוסות או חריצים (להספקים גבוהים בעיקר).

1.9.3 בקרה ספרתית

בקרה ספרתית NC (Numeric Control) הוכחה כמשתלמת ביותר ב-EDM בשל המחיר הנמוך בו ניתן להכין תבניות, ללא הצורך להכין את הכלים הצורתיים. תחת זאת מבצע חוט נוסע את המסלול הרויש תוך סילוק חומר מינימלי. כמו כן ניתן לעבד מסלולים (חריצים) צורתיים במיגיון רחב של חומרים. יש להניח כי שיטה זו תוכח כעריפה על פני שיטות מקובלות ב-EDM⁽⁶⁾.

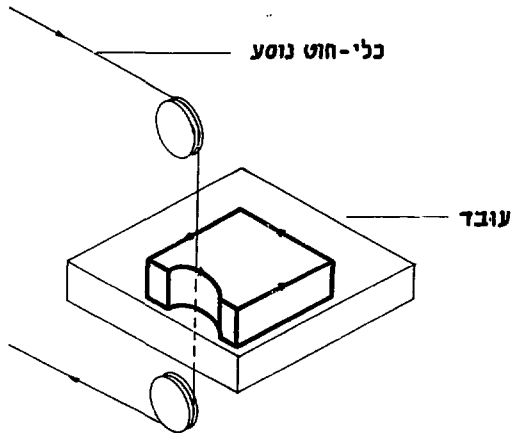
1.10 עתיד ותחזיות

ככל שמרע החומרים מתפתח בכיוון החומרים הקשים לעיבוד קונבנציונלי עולה חשיבות ה-EDM כאמצעי ליצירת חלקים מנתכים אלה. לשם כך יש לשפר את המכשירים הקיימים בעיקר בשני כיוונים:

(א) פיתוח מנגנון שיפקח בצמוד על תנאי העיבוד כך שיישמרו תנאים אופטימליים בכל מחלף העבודה.

(ב) כפיתוח שיטות עיבוד נומריות שיבטלו את הצורך בהכנת אלקטרודות יקרות ובהצמדת כוח אדם למכשירי EDM.

בציור 3 ניתן לעמוד על איופן העיבוד בטכניקת NC. חוט נוסע מתקדם בחומר המעובד לפי מסילה שהותוותה מראש באמצעות המחשב.



ציור 3 חוט נוסע
מבוקר ספרתית לייצור
גופים צורתיים.

2 מתקן EDM

2.1 מניעים לפיתוח במתקן EDM במעבדה המטלורגית (קמ"ג)

פרט להיותו אמצעי עזר חשוב בכל מעבדה מטלורגית החעורר הצורך להשתמש ב- EDM כעקבות הדרישה לעיבוד חומר מתחתי פריך ביותר לצורות גיאומטריות עדינות. כתוצאה

מהכרת טכניקת ה-EDM והמיכשור הקיים בשוק (Servomet של Metal Research, אנגליה, D10

של Charmillies ו-AB של Agie, שניהם משוייץ) הועלה הרעיון לבנות מתקן כזה למעבדה המטלורגית, אשר צרכיה המיוחדים אינם מצדיקים רכישת מכשיר תעשייתי. מכשיר כזה עשוי להיות

לעזר רכ במעבדות נוספות בקמ"ג ומחוצה לה כפי שיבואר להלן.

2.2 חלקי המתקן

2.2.1 המערכת המכנית

בציור 4 מופיע תרשים סכימטי של המתקן. כבסיס נלקח שולחן x-y מתוצרת Schaublin, שוייץ, וכזר 2 גררה (מתוצרת Schaublin) ממוקחת מנוע SLO-SYN מתוצרת Superior.

2.2.2 מערכת הסרוו (servo)

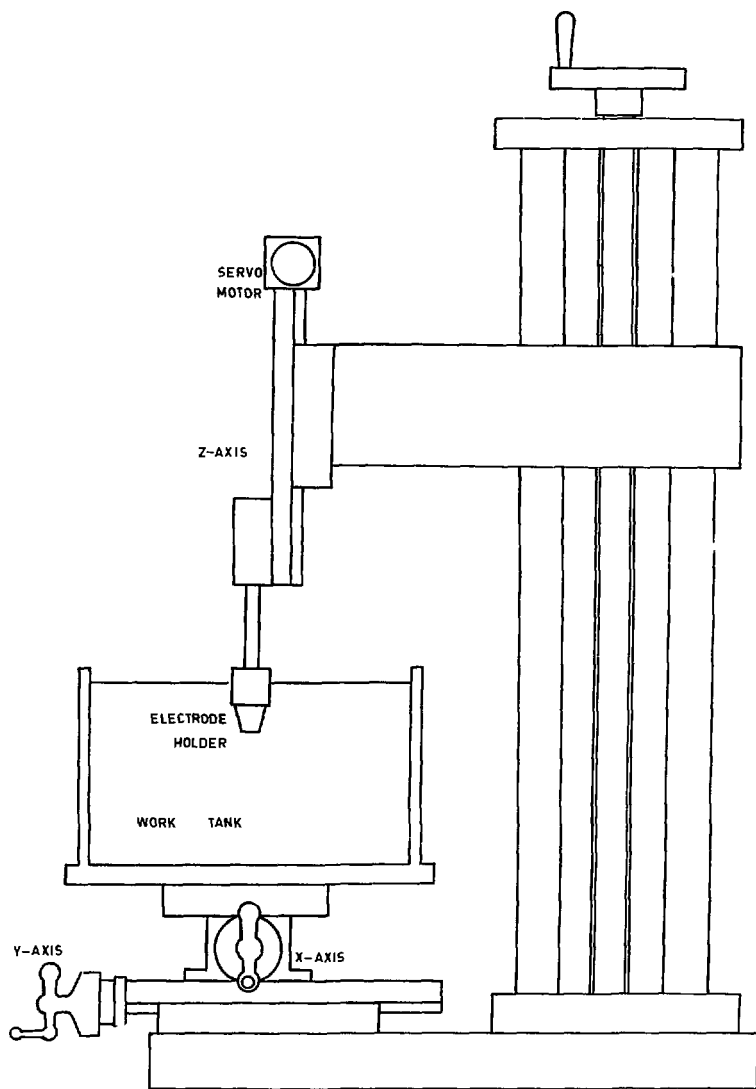
החלק האלקטרוני של מערכת הסרוו מבוסס על מגבר הפרשים המשמש כמעגל לגלוי המתח הכין-אלקטרוני⁽⁷⁾. מתח היציאה ממוחג על ידי שני מתגים אלקטרוניים (Triac), בהתאם לסימון המתח, אל כל אחת מכניסות המנוע. כתוצאה יסתובב המנוע לכיוון אחד עבור מתח בין אלקטרוני נמוך (קצר) ולכיוון השני עבור מתח בין אלקטרוני גבוה (מצב עבודה).

2.2.3 המערכת החשמלית - גנרטור

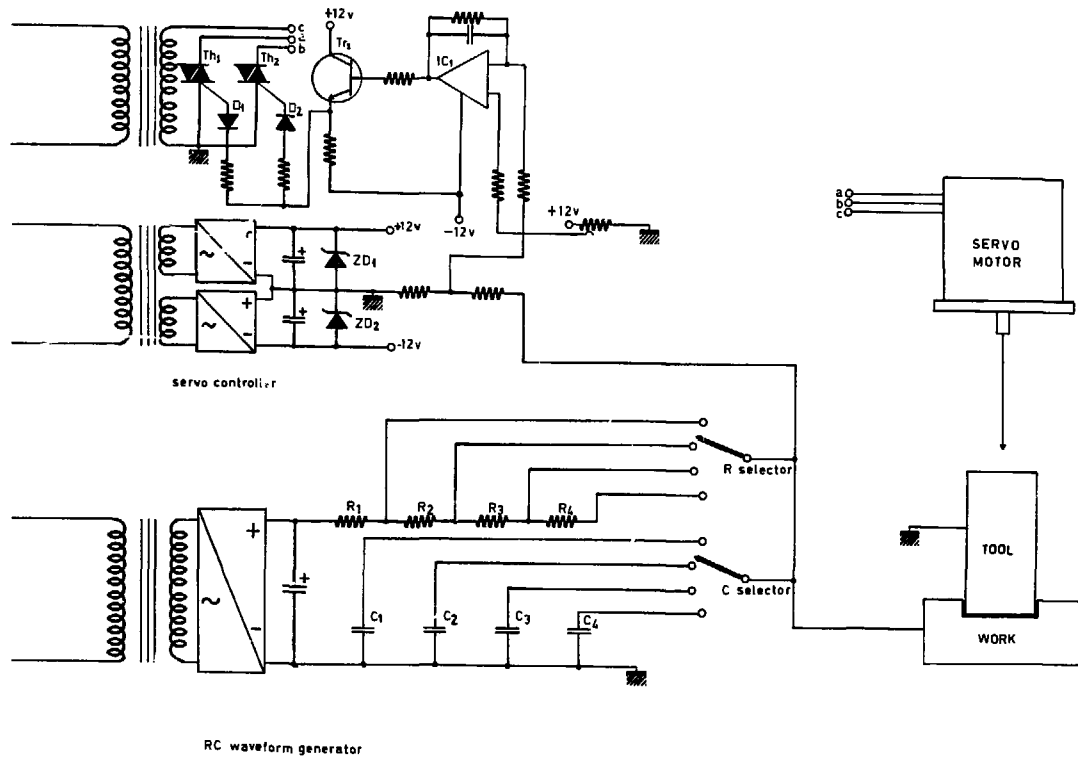
הגנרטור מבוסס על סדרת קבלים - נגדים היוצרים את תנאי העבודה כל צירוף נגד-קבל מאפשר אנרגיה ומשכי התפרקת שונים. מתח ההתפרקות נקבע על ידי מתח הייחוס בכניסה למגבר ההפרשים - וזהו מתח הסף הקובע את כיוון סיבוב מנוע הסרוו. כן נוספו לגנרטור מימטר כספית כיציאה לאלקטרודות - למניעת קשתות, וריודה למניעת קצרים. התרשים החשמלי-אלקטרוני של המכשיר מופיע בציור 5.

2.2.4 מערכת הנוזל הדיאלקטרי

הנוזל הדיאלקטרי, שהוא במקרה זה נפט רגיל, מצוי במיכל פל"ם. מתוך מיכל זה נשאב הנפט אל מיכל העבירה על ידי משאבה טובלת - מהסוג המשמש לסחרור מי קרוז כמכשירי עיבוד שבבי. מערכת בזזי-רצע סיבוב מאפשרים מילוי מהיר של מיכל העבודה, ריקון מהיר, והסלנת נפט אל אזור העיבוד. על מיכל הפל"ם מורכבים שני מסנני $25 \mu\text{m}$, דרכם מועבר הנפט אל מיכל העבודה. תרשים מערכת הנוזל הדיאלקטרי מובאת בציור 6.



ציר 4 תרשים סכימטי של המערכת המכנית של מתקן ה-EDM.



ציור 5 תרשים חשמלי - אלקטרוני של מתקן ה-EDM.

2.3 אביזרים

2.3.1 אלקטרודות

(א) אלקטרודת חוט נוסע: אלקטרודה זו משמשת לחיתוך פרוסות (עד עובי 0.15 מ"מ) וביצוע מסלולים-חריצים בהתאם לצורך. החוט הוא מנחושת ($\phi 0.12 \pm 0.38$ mm) ומהירות נסיעתו 30 ± 350 mm/min. הפיתוח המקורי העיקרי לאביזר זה בעבודה הנוכחית הוא מובילי הזכוכית של החוט המנקזים אותו מכל עבריו בזמן החיתוך. תרשים האלקטרודה מופיע בצירוף 7.

(ב) תפסנית עובד מסתובבת: עיבוד של עובד מסתובב מאפשר ניקוז יסודי יותר של אזור העיבוד. כמובן, פעולת הסיבוב באה בחשבון רק בחלקים בעלי סימטריה גלילית. הפיתוח המקורי העיקרי הוא שיטת הסיבוב בתוך מיכל העיבוד. לפי שיטה זו מסתובבת התפסנית בכוח זרם הנפט על גלגל כפוג המחובר אליה. בכלי זה ניתן להשתמש גם לקדיחת חורים.

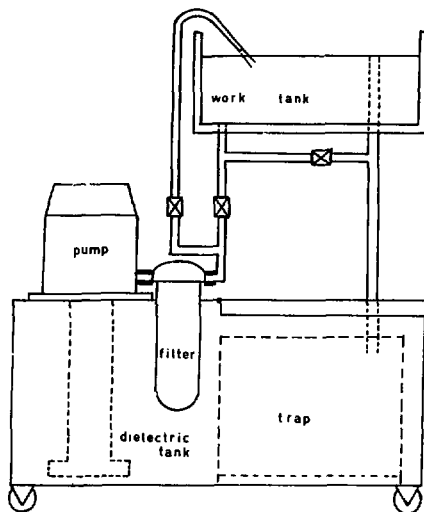
(ג) תפסנית חוטים: זו משמשת לצורך חיתוך פרוסות או מוטות רבים בבת אחת. חוטים המסודרים שתי וערב, מאפשרים חיתוך בבת אחת של מספר פרוסות או מוטות, פני השטח הם טובים יותר מבחוט הנוסע. החוט הוא כדרך כלל טנטלום. לפי עקרון זה ניתן גם להרכיב תפסנית פחיות.

2.3.2 עיבודים מיוחדים

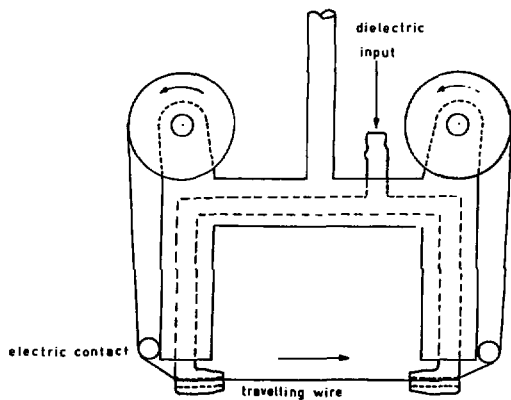
פרט לעיבודים מיוחדים ניתן להזכיר את הכנת האבקות ב-EDM, כעיבוד מיוחד שאינו קשור בצורה כלשהי הנדרשת בתום העיבוד. עיבודים כאלה נעשים בחנקן כרי לקבל אבקה נקייה.

2.4 תוצאות ומסקנות

המתקן הנוכחי שהוא מודל משופר של מתקן ראשוני מסוגל לבצע מיגוון רחב של עבודות בשרות המעבדה. הפיתוח הרציני העיקרי שניתן להגדירו כמקורי הוא מערכת ה-sezvo. מערכת זו משביעת רצון מבחינת מהירות הגובה ומבחינת אמינות. גם יתר חלקי המכשיר לא נפגעו במהלך השנתיים האחרונות בהן הופעל המכשיר כמעט ברציפות.



ציור 6 מערכת הנוזל הדיאלקטרי.



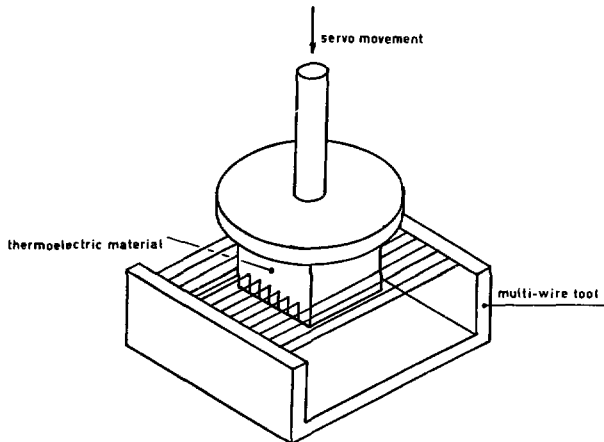
ציור 7 כלי חוט נוסע לחיתוך פרוסות ב-EDM.

- רשימת כמה מהעבודות שבוצעו עד עתה כמתקן EDM הנוכחי מופיעות בפרק 3. מאידון, ניתן להצביע על החסרונות הבולטים הבאים:
- (א) קצבי איכול נמוכים (סדרי גודל של $1+20 \text{ mm}^3/\text{min}$).
- (ב) כיוון מכני גרוע (ניצבות ומקבילות של חלקי המכשיר השונים).
- (ג) עיצוב חיצוני לקוי.

3 דוגמות לניצול מתקן EDM כמעבדה המטלורגית

3.1 חיתוכים בחומר תרמואלקטרי

כנזכר הוחל כפיתוח המכשיר עקב הצורך לבצע חיתוכים בחומר תרמואלקטרי. מאז פותחה השיטה⁽⁸⁾ לביצוע חיתוכים חלקים ומדויקים. אחד מסידור האלקטרודות שנוסה בהצלחה מופיע בצירור 8. בסידור זה כלי העבודה סטטי (סריג חוטי טנטלום) בעוד העובד משולב למערכת ה-servo.



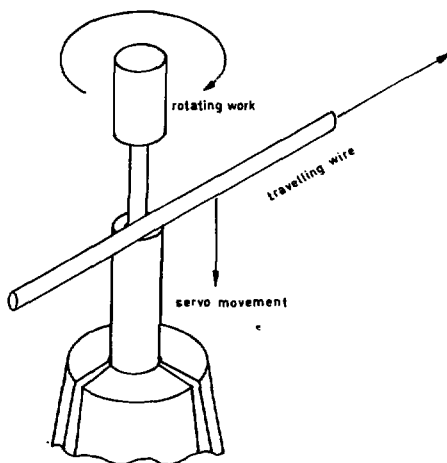
צירור 8 סידור האלקטרודות לחיתוך חומר תרמואלקטרי ב-EDM.

3.2 הרקת דגמים למיקרוסקופיה אלקטרונית

אחת השיטות היעילות להרקה ראשונית של דגמים למיקרוסקופיה אלקטרונית היא ב-EDM. בכלי חוט נוסע כוצעו במכשיר זה חיתוכי פרוסת (דיסקות) בעובי החל מ- 0.12 מ"מ, ממגוון רחב של חומרים, כולל חומרים רעילים ורדיואקטיביים .

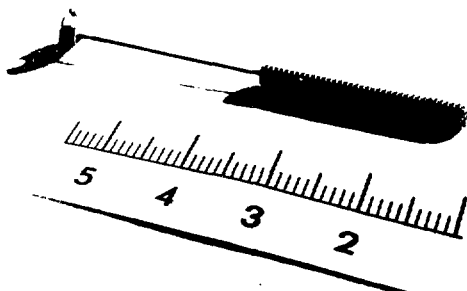
3.3 הצרה למוטות טיטניום

טיטניום ידוע בהולכיכות החום הנמוכה שלו. תכונה זו נוצלה על ידי כחירת ברגי טיטניום להידוק משטחים שוני-טמפרטורה. להקטנה נוספת של מעבר החום נעשתה הצרה של שטח החתך של כורג הטיטניום. ציור 9 מתאר את תהליך הכנת ההצרה וכציור 10 מתואר כורג פליז מסוג זה שהוכן בשלבי הנסיונות.



ציור 9 הצרת מוט ב-EDM; עיבוד תוך ביצוע 3 סוגי תנועה.

ציור 10 בורג פליז
בעל צוואר שהוצר ב-EDM.



4 סיכום

הוצג מתקן EDM שיתרונותיו העיקריים הם:

- (א) מכנה מכני וחשמלי פשוט.
- (ב) מערכת סרוו מהירת תגובה.
- (ג) מחיר נמוך של ייצור וחלקים, יחסית, למכשירי EDM קיימים.

עקב תכונות אלה עשויה המכונה הנ"ל להיות שמושית ביותר כמעבדות - לצורך חיתוך ועיצוב דגמים מתכתיים, ובכתי מלאכה - לעבודות עדינות ומיוחדות.

References

רפ"מ

1. C. H. Wick, "All about electrical and chemical machining-1 State of the Art", Machinery (NY) 76, 86-9 (1969).
2. I. A. Bucklow and M. Cole, "Spark machining", Review 135, Metallurgical Reviews, 14, 103-18 (1969).
3. J. E. Greene and J. L. Guerrero-Alvarez, "Electro-erosion of metal surfaces", Metallurgy Transac. 5, 695-706 (1974).
4. C. C. Wilson, *Analysis of EDM (Electric Discharge Machining): Performance-Wear-No Wear in the Copper Steel System*, SME technical paper MR70-115, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 1970.
5. C. Luke and K. E. Puttick, "Dislocation damage by spark cutting in cadmium single crystals", J. Phys. D:Appl. Phys. 4, 967-73 (1971)
6. D. L. Boyd, *N/C-TW-EDM Process (Numerically Controlled, Traveling Wire, Electric Discharge Machining Process)* SME technical paper MS70-159, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 1970.
7. C. Verge and W. R. Datars, "An electronic spark cutter", J. Phys. E: Sci. Instrum. 1, 1239-40 (1968).
8. M. Lanxner, "Electric discharge slicing of thermoelectric materials", in *Research Laboratories Annual Report for 1973 and 1974*, IA-1308, Israel Atomic Energy Commission, February 1975, pp 208-9.