

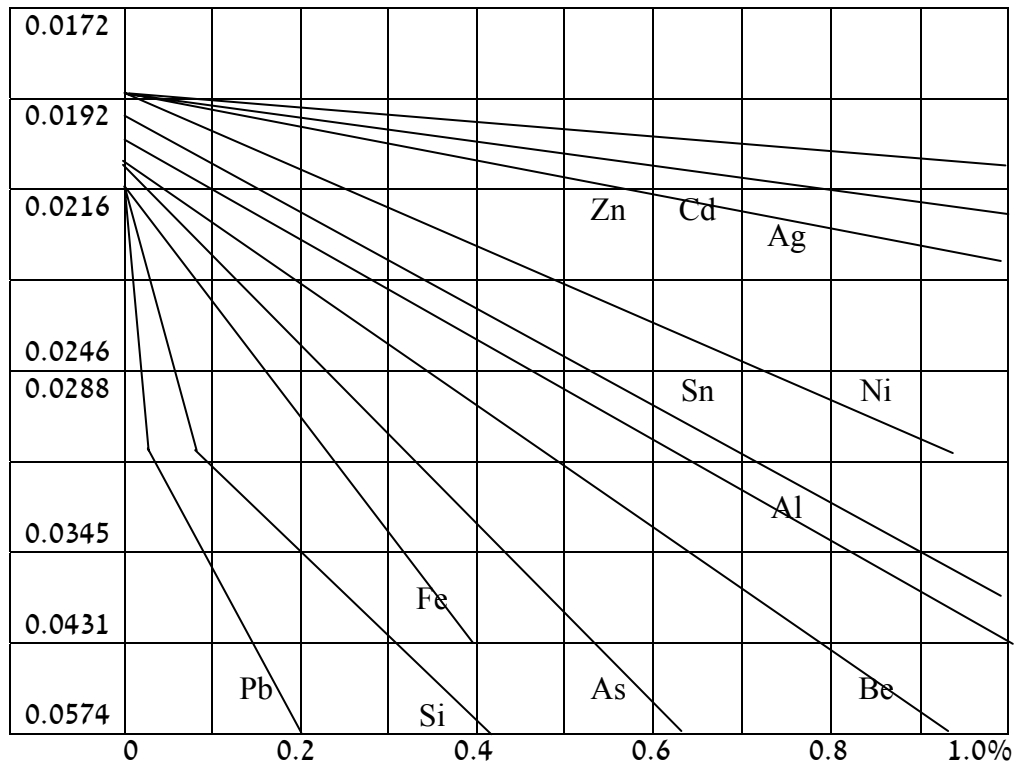
חומרים בעלי מוליכות גבוהה.

(א) נחושת (Cu)

הנחושת נמצאת עפ"י רוב בצורה עפרות שהן בעיקר תרכובות של הנחושת עם גפרית (S) או בצורת תחמוצת הנחושת. את הנחושת מפיקים מעפרותיה בתהליכים מטלורגיה מקובלים. בארץ – הנחושת נמצאה בתרכובות עם זרחן ועם סיליקטים. שיטות הפרדת הנחושת מעפרות של סוג זה מסובכות יותר.

בעיבוד מטלורגי מפרידים את הנחושת מרוב התוספות ומקבלים מתכת המכילה לא יותר מ-1% עד 1½% של לכלוכת המכילה: זהב, כסף, ביסמוט, עופרת, ברזל, אבץ, ניקל, קובלט, גפרית, וחמצן. נחושת בעלת תוספות אלו אינה מתאימה לשימוש בתעשיית החשמל, הואיל ואף האחוז הקטן של חומרים אחרים מקטין במידה ניכרת את המוליכות של הנחושת (ציור 5). בתעשייה של חומרי חשמל משתמשים בנחושת מזוקקת בדרך אלקטרוליטית והמכילה בערך 99.9% של נחושת טהורה. בגמר האלקטרוליזה מתיכים מחדש את הלוחות של הנחושת הטהורה (לוחות הקטוד) ומקבלים גולמי נחושת לפי המידות הדרושות לסוגי ייצור השונים. לייצור תילים מעבירים את גולמי הנחושת דרך תהליך של ערגול חם. אחרי הערגול מסירים את תחמוצת הנחושת (CuO).

המתהווה בשעת החימום, בעזרת תמיסה דלילה של חומצה גפריתית (H_2SO_4). על מנת לקבל תילים בעלי קוטר דרוש מושכים את הנחושת במצב קר. אם הנחושת האלקטרוליטית מכילה חמצן בכמות ניכרת בתוך התוספות אשר נכללות בה - מתבטאת השפעתו על-ידי שבירות הנחושת. לייצור תילים דקים (עד לקוטר של 0.015 מ"מ) משתמשים בנחושת אל-חומצית, אשר בה כמות החמצן אינה עולה על 0.02% מתוך 0.05% של כלל התוספות.



חומרי תוספת לנחושת (באחוזים).

ציור 5

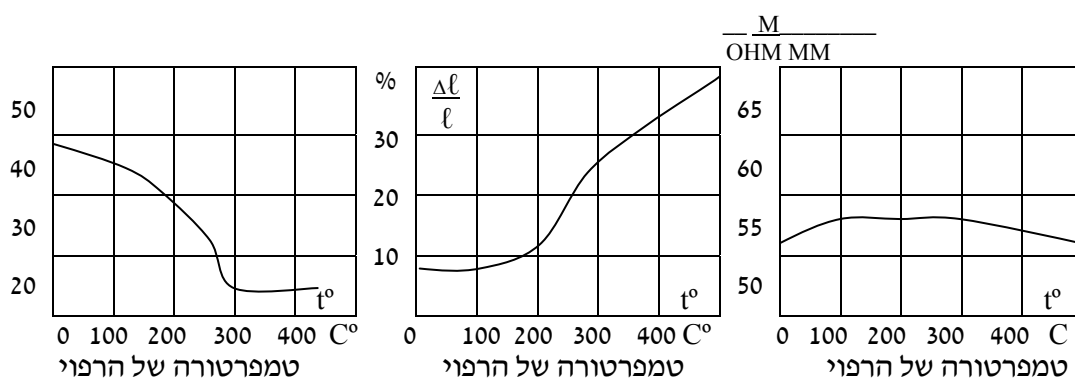
השפעת תוספת מתכות על ההתנגדות של הנחושת.

בתהליך של משיכה בקר מתקבלת נחושת קשה. סגולותיה: ניכר בקריעה עם התארכות קטנה, קושי מספיק וקפיציות מסוימת.

אם לאחר המשיכה בקר מעבירים את התיל ע"י חימום עד לטמפרטורה של כמה מאות מעלות צלזיוס וקירור איטי אחרי זה (תהליך זה קרוי ריפוי הנחושת), מקבלים נחושת רפוייה או רכה. סגולותיה – התנגדות קטנה יותר לקריעה מאשר הנחושת הקשה עם התארכות גדולה יותר, הקושי של הנחושת קטן באופן ניכר: המוליכות החשמלית גדלה בריפוי (ראה ציור 6). העקומים מתארים את השינויים בסגולות הנחושת, החלים בה לאחר הריפוי בדרגות חום שונות.

המשקל הסגולי של הנחושת רפוייה הוא 8.89 גרם לסנטימטר מעוקב (לפי התקן הבינלאומי). טמפרטורת ההתכה של הנחושת 1083°C . הטמפרטורה של הרתיחה של הנחושת 2310°C . ההתנגדות הסגולית של הנחושת הרפוייה בעלת מוליכות של 100% שווה ל-1/58 אום-ממ"ר למטר או 0.017241 אום-ממ"ר למטר.

ההתנגדות הסגולית של נחושת רפוייה (תילים מסחריים החתכים, בלתי מצופים בדיל) 1/57 או $0.0179 \div 0.0182$ אום-ממ"ר למטר (הערך הגבוה מתייחס לתילים דקים). בשביל תילים מצופים בבדיל נוהגים לקבל את הערכים הבאים להתנגדות הסגולית:



ציור 6.

השינויים בסגולות הנחושת בטמפרטורות ריפוי שונות

תילים שקוטרם גדול מ-0.3 מ"מ-	או 1/53	או 0.01887	אום	ממ"ר למטר
" " בין 0.1 עד 0.3 מ"מ-	או 1/55.5	1.01802	"	"
" " קטן מ-0.1 מ"מ	או 1/54.5	0.01835	"	"

שינוי ההתנגדות כתוצאה משינויים בטמפרטורה מבוטא בנוסחה (2) המקוצרת, ובשביל שינויים בטמפרטורה בין 0°C ל- 100°C לגורם α בשביל הנחושת בעלת מוליכות 100% יהיו הערכים הבאים:

$\alpha_0 = 0.00427 - 0^{\circ}\text{C} = t_1$	בשביל
$\alpha_{21} = 0.00393 - 20^{\circ}\text{C} = t_1$	בשביל
$\alpha_{31} = 0.00385 - 25^{\circ}\text{C} = t_1$	בשביל

בהיות הנחושת התקנית הרפוייה בטמפרטורה של 20°C יהיה גורם ההתפשטות קוויות שלה שווה ל-0.000017 לכל עלית הטמפרטורה במעלת צלזיוס אחת.

בטכניקה משתמשים במערכת שלמה של סוגי נחושת שונים, אך נוהגים לחלק את כל הסוגים ל-3 סוגים עיקריים: נחושת קשה, למחצה ונחושת רפוייה.

תכונות סוגים אלה נתונות בטבלה 1.

טבלה 1. תכונות הנחושת.*

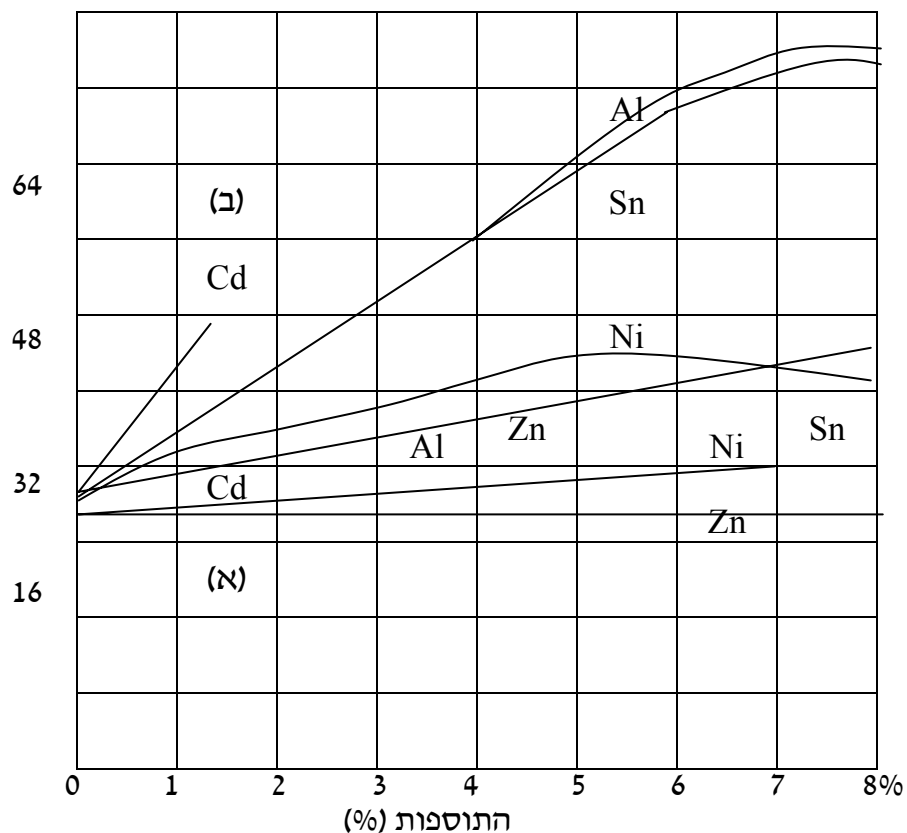
הקשה	הקשה למחצה	הרפוייה	משקל סגולי התנגדות למשיכה התארכות בקריעה עמיסה מותרת למשיכה עמיסה מותרת לכפיפה
8.96 40÷45 0.5÷3 14÷19 1000÷14000	8.95 30÷38 10÷13	8.90 24÷26 18÷35 5	גרם לסמ"ק ק"ג לממ"ר % ק"ג לממ"ר ק"ג לסמ"ר

בנחושת הרפוייה משתמשים בתעשיות חשמל לכבלים, לתלי ליפוף בשביל מכונות חשמל, בקשה למחצה – לרשתות אוויריות, ובנחושת הקשה – למוליכי חיבור במכשירי חשמל, פסי צבירה, קולקטורים וכו'.

- המספרים אשר בטבלה – הם ערכים ממוצעים, ובכל מקרה יש לקבל בחשבון את הנתונים המיוחדים של סוג הנחושת הנדון.

(ב) נתכי נחושת.

בתעשייה החשמלית נדרשים במקרים רבים חומרים מוליכים אשר, מחוץ לתכונות מוליכותם הגבוהה, צריכים לעמוד במאמצים מכניים מוגברים, המתהווים עקב תנאי שרותם. במקרים אלה משתמשים בנתכי נחושת עם חומרים אחרים. תוספת חומרים אחרים לנחושת מגדילה את התנגדות הנתך בהשוואה לנחושת, אך בו בזמן גם מגדילה את כוח עמידתו של הנתך בפני מאמצי משיכה (ראה ציור 7) וגם מעלה את קשיותו.



השפעת תוספות-מתכת שונות על ההתנגדות הזמנית לקריעה:
(א) נחכים רפויים; (ב) נתכים מעורג לים בקר.

את נתכי הנחושת מחלקים סוגים עיקריים : 1) ארדים (ברונזות), 2) פליזים.

1. הארד – הוא נתך, המכיל כמות מסוימת של בדיל ונוסף לכך גם חומרים אחרים. אך בתקופה האחרונה מיצרים ארדים שאינם מכילים כלל בדיל, אלא חומר אחר. כמות הבדיל בארד יכולה לעלות עד 17.5% אך עפ"י רוב אינה עולה על 12% - 11%. ארד המכיל עד 15% בדיל ניתן לעיבוד פלסטי בנפחות : בארדים המכילים יותר מ-15% בדיל משתמשים ליציקה בלבד. בארדים משתמשים בעיקר לאותם חלקי הציוד, שבהם ישנם מאמצים מכניים והם, ולא המוליכות, קובעים את המידות של החלק המסוים (כגון חיבורים פנימיים בהתקני פיקוח שונים, חיבורים קפיציים וכיו"ב).

לברונזה זרחנית – הסגולה המיוחדת לעמוד היטב בפני חיכוך – שבה עקב ניתוק המגע בין שני חלקים מוליכים. לכן משתמשים בברונזה זו וגם בברונזה צורנית למיגעות נעות של מכשירי חיבור וניתוק.

2) **הפליז** – הוא נתך של נחושת המכיל אבץ. האבץ מהווה כרגיל בין 9% עד 45% של כלל הנתך. כוח עמידתו של הנתך בפני מאמצי קריעה הולך ועולה עם עליית אחוז האבץ על 45%, אך כבר באחוז זה הנתך הוא שביר מאד. אם הנתך מכיל אבץ יותר 45% - פוחת חוזק הנתך. ההתארכות היחסית בקריעה עולה עם עלות אחוז האבץ עד 30% ופוחתת אחרי זה, ובפליז המכיל 50% של אבץ – שווה ההתארכות היחסית כמעט לאפס.

הפליזים שמשתמשים בהם באלקטרו טכניקה מכילים מ-28% ועד 42% של אבץ. הפליזים ניתנים לעיבוד במחרטה וגם בנפחות ומשתמשים בהם לבנין מיגעות קבועות במכשירי חשמל, לברגים, ולחלקים אחרים שנועדו להולכת הזרם.

התכונות החשמליות והמכניות של ארדים ופליזים נתונות בטבלה 2.

טבלה 2. תכונות חשמליות ומכניות של נתכי נחושת.

הנתך	מתכות-תוספות (%)	סוג העיבוד	התנגדות סגולית (אום-ממ"ר למטר)	חוזק זמני בקריעה (ק"ג לממ"ר)	התארכות (%)
ארד-קדמיום	Cd-0.8 Sn-0.6	רפוייה משוכה בקר	$0.0339 \div 0.0292$ $0.0386 \div 0.0339$	29 עד 73	55 4
ארד-קדמיום	Cd-0.9	רפוייה משוכה בקר	0.01837 $0.0217 \div 0.0192$	31 עד 73	50 4
ארד-אלומיניום	Al-2.5 Sn-2	רפוייה משוכה בקר	$0.1170 \div 0.0974$ $0.1170 \div 0.0974$	37 עד 97	45 4
ארד זרחני	Sn-12 P-0.2÷1	רפוייה משוכה בקר	$0.1754 \div 0.1170$ $0.1754 \div 0.1170$	40 105	60 3
פליז אדמדם	Zn-9	רפוייה משוכה בקר	0.0420	25 35 ÷ 40	
פליז	Zn-30	"	0.0699	32 ÷ 35 עד 80	70-60 5
פליז לברגים	Zn-40 Pb-2	"	0.0598	40 50	20 22

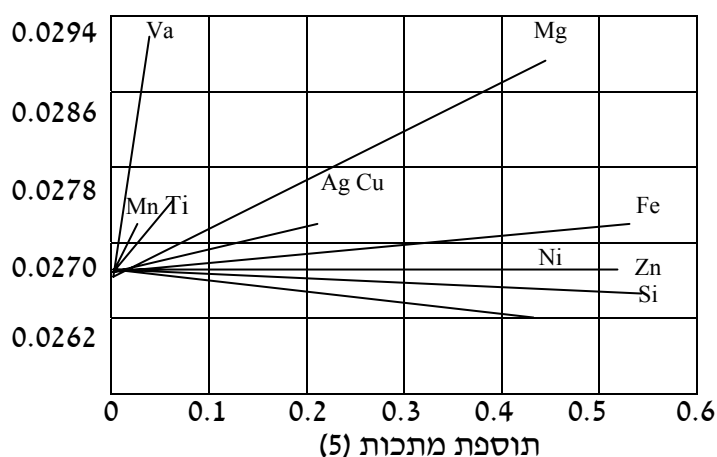
ג) אלומיניום (Al).

אלומיניום – הוא אחד היסודות הנפוצים ביותר בטבע והוא השני בחשיבותו אחרי נחושת בשורת חומרים בעלי מוליכות גבוהה. האלומיניום בצורתו הטהורה המתכתית איננו נמצא בטבע. תרכובותיו של אלומיניום, הנקראות סיליקטים, מהוות את החלק העיקרי של חרסית בצורותיה השונות, ושל פיצלת השדה: ע"י זה נכנס האלומיניום להרכב רבים מאבני הסלעים. על אף שכיחותו הופק האלומיניום רק בשנת 1927 בפעם הראשונה בצורת אבקת מתכת. במשך שנים רבות הכמות המופקת של האלומיניום המתכתי הייתה קטנה ביותר, ולכן לא יכול היה לרכוש, בגלל מחירו הגבוה, את מקומו בתעשייה. עם פיתוח שיטות אלקטרוליטיות להפקתו, חודר האלומיניום לכל ענפי התעשייה ובמיוחד לתעשיית החשמל, בגלל מוליכותו הגבוהה ומשקלו הסגולי הנמוך.

גולמי האלומיניום המתקבלים בדרך אלקטרוליטית עוברים את העיבוד בערגול ובריפוי ונכנסים לתעשייה בצורת תלים, לוחות וכיו"ב. לפי כמות התוספות של מתכות אחרות מחלקים את האלומיניום לשני סוגים: (1) אלומיניום לבנין וכלים, המכיל 96% של אלומיניום טהור.

(2) אלומיניום לתעשייה חשמלית המכיל $99.6\% \div 99.4\%$ של אלומיניום טהור. ליצור עלעלי אלומיניום דקים, שבהם משתמשים בקבלים (קונדנסטורים) – דרוש אלומיניום נקי יותר מתוספות: אחוז התוספות בו אינו צריך לעלות על 0.05%.

מוליכות האלומיניום פוחתת עם עליית אחוז חומרים אחרים במתכת (ראה ציור 8).



ציור 8.

השפעת תוספת מתכות על ההתנגדות של האלומיניום.

החוזק בקריעה משתנה אף הוא עם אחוז התוספות ועלול לגדול עד פי-שנים בנתכים אחדים של האלומיניום עם נחושת. ההתנגדות חשמלית של נתכים אלה גדלה, אך לא במידה ניכרת – עד בערך 0.0321 אום-ממ"ר למטר. המשקל הסגולי של אלומיניום מעורגל – 2.7 גר' לסמ"ק, המשקל הסגולי של אלומיניום יצוק – 2.6 גר' לסמ"ק; טמפרטורת ההתכה של האלומיניום 658°C , טמפרטורת הרתיחה של האלומיניום 1800°C . ההתנגדות הסגולית של אלומיניום כמעט טהור מתוספות – היא 0.0265 אום-ממ"ר למטר, ומוליכותו אינה מושפעת כמעט ע"י המשיכה בקר או הריפוי. ההתנגדות הסגולית לפי הנתונים של הועדה הבין-לאומית לאלקטרו טכניקה היא: לתלי אלומיניום משוכים בקר – 0.02828 אום-ממ"ר למטר, ולתלי אלומיניום הרפויים – 0.0278 אום-ממ"ר למטר.

מקדם שינוי ההתנגדות α בטמפרטורה של 20°C שווה 0.004. בטמפרטורה בין 30°C ל- 100°C יהיה גורם ההתפשטות קווית של האלומיניום שווה בקירוב 0.000023 לכל מעלת צלזיוס. התכונות המכניות של האלומיניום הן:

אלומיניום משוך בקר	אלומיניום	
16÷17 1.5÷2 400÷600	8 ÷10 10÷18	חוזק זמני במשיכה ק"ג לממ"ר התארכות בקריעה % עמיסה מותרת בכפיפה ק"ג לסמ"ר

Specification - COPPER-

נחשת אלקטרוליטית

MARK QTY CLASS (MT)	RELATIV ELONGNAT	RESISTIV OHM/mm2.M	TORSION & UNTWINE	DIAM MM	CONTANT OF OXYGEN ON
KMO ø 8	35%	0.01724	10 x 10	8.0	0.015%

CHEMICAL ANALISIS

29-Copper	8-Oxygen	83-Bismuth	51-Antimony	33 -Arsenic	26 –Iron
CU	O	BI	SB	AS	FE
99.96%	0.04%	0.001%	0.002%	0.002%	0.003%

28-Nickel	82-Lead	50-Tin	30-Zinc	16-Sulfur	47-Silver
NI	PB	SN	ZN	S	AG
0.002%	0.003%	0.002%	0.003%	0.002%	0.003%

נחשת נקייה – CU – 99.99% ; נחשת אלקטרוליטית - 99.96%