

ערגול

מטרות המעבדה:

- 1.1 הכרת תהליך הערגול
- 1.2 הכרת השפעת פרמטרים שונים על תהליך הערגול
- 1.3 בדיקת שינוי תכונות מכאניות כתוצאה מתהליך הערגול
- 1.4 בדיקת אנאיזוטרופיות בחומר מעורגל.

2. רקע תיאורטי

קיימות שלוש טכניקות עיקריות לעיצוב פלסטי של מתכות – ערגול (Rolling), חישול (Forging) וטירוד (Extrusion).

חישול – עיצוב בכבישה, לחיצה (סטטידינאמי) על ידי מכשופטיש כנגד טבע צורתי (Die). המוצר מקבל את צורתה של התבנית כאשר הוא ממוקם כחומר גלם בין הפטיש לסדן.

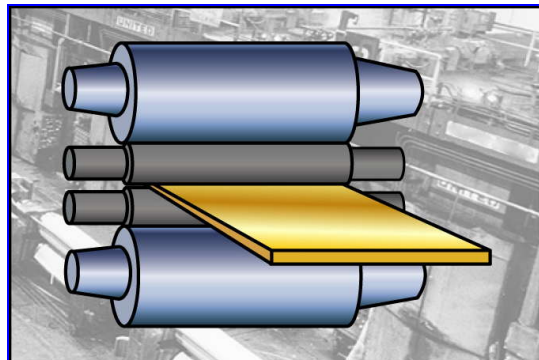
טירוד – (שיחול) החומר "מוזרק" דרך טבע צורתי. המוצר המתקבל מעוצב על פי חתך הטבע. חומר הגלם נלחץ עד לכניעה וזורם דרך פתח הטבע.

תהליך דפורמציה של מתכת העוברת בין גלילים נקרא **ערגול**. בתהליך זה המתכת מוטרחת למאמצי לחיצה גדולים מאוד ולמאמצי גזירה שטחיים הנובעים מהחיכוך בין המתכת והגלילים. כוחות החיכוך גורמים למשיכת המתכת לתוך הגלילים, כאשר:

I. חיכוך קטן מדי – קשיים בהזנת החומר לתוך הרולים.

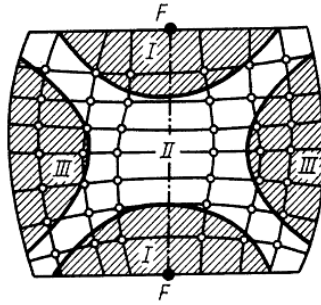
II. חיכוך גדול מדי – התפשטות משנית וסדקים בקצוות החומר.

מטרת התהליך הינה קבלת רדוקציה מקסימאלית בכל מהלך וקבלת עובי מינימאלי סופי לאחר מספר מהלכים.



איור 1. תהליך ערגול

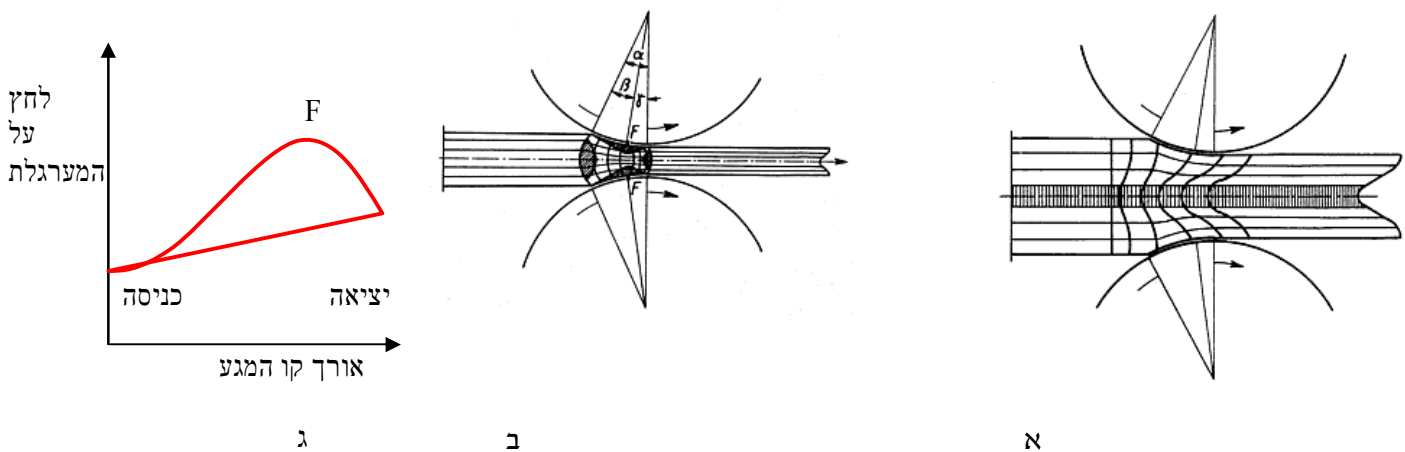
ניתן להתייחס לתהליך הערגול כתהליך דפורמציה אזורי שבמהלכו העובי קטן, האורך גדל והרוחב נשאר קבוע. הדגם מוכנס ומתקדם דרך המערגלות בזכות החיכוך שמושך אותו פנימה כשהמערגלות מסתובבות. בכדי להבין את האפקטים המיקרוסקופיים המתרחשים כאשר מתכת עוברת בין מערגלות נעות, יש להבין תחילה מה קורה בניסוי **לחיצה** של מתכת בין שני משטחים סטטיים – לחיצה פשוטה. כפי שניתן לראות באיור 2 הלחץ אינו מפוזר באופן אחיד ויש אזורים אשר מושפעים יותר מאחרים.



איור 2. משטר המאמצים על דגם גלילי הנלחץ בקצותיו.

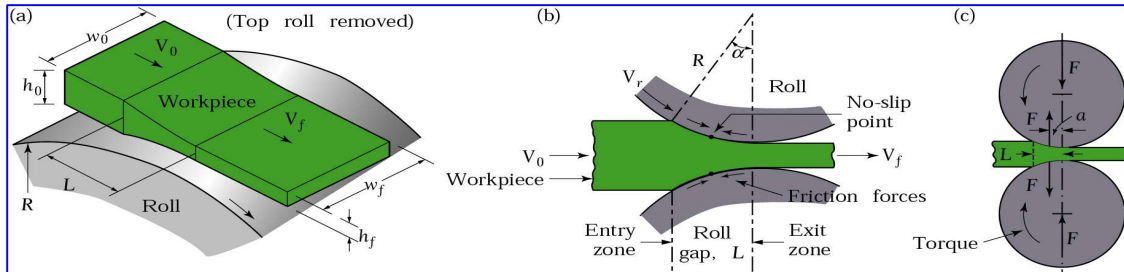
- I. המגע בין משטחי הלחיצה ופני השטח של המתכת מייצרים חיכוך כה עצום עד כי המתכת אינה יכולה להתפשט לצדדים.
- II. אזור בעל דפורמציה אחידה.
- III. באזורים אלו אין דפורמציה מכיוון שאין ריתום של החומר והוא חופשי לנוע.

כעת, נשתמש בהבנה שרכשנו מניסוי הלחיצה עבור תהליך הערגול. כמו בלחיצה, המערגלות יוצרות חיכוך בנקודות המגע עם הדגם, ומגבילות את יכולתו לזוז באזור זה. לכן, הנטייה לדפורמציה גדולה מתרחשת באזורים הפנימיים כפי שניתן לראות באיור 3.



איור 3. א- זרימת החומר ; ב- משטר המאמצים במהלך הערגול.

האזור בו הדפורמציה מרבית נמצא בציר FF (איור ב3), קצת לפני יציאת החומר מהמערגלות. באזור זה זרימת החומר הפנימי איטית יותר יחסית לשכבות החיצוניות (איור א3).



איור 4. מימדי החלק לפני ואחרי הערגול; (a) מבט צד; (b) מבט על.

מתוך הנחה שנפח החומר הנכנס אל בין הגלילים שווה לנפח החומר היוצא, ניתן לכתוב לפי איור 4, בהנחה שמימד הרוחב אינו משתנה במהלך הערגול ותנאי חיכוך קבועים לאורך קשת מגע:

$$W_0 h_0 V_{in} = W_f h_f V_f$$

כאשר:

-W רוחב הקטע המעורגל

-h העובי החומר

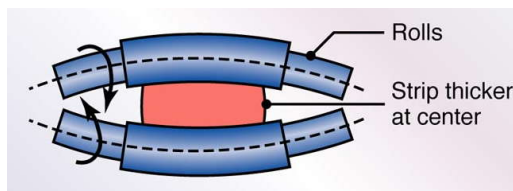
-V מהירות העובד

ניתן לראות כי מהירות היציאה (V_f) של החומר גבוהה ממהירות כניסתו (V_{in}) אל בין המערגלות, כך שקיימת נקודה אחת שבה המהירויות צריכות להיות שוות זו לזו. בנקודה זו שנמצאת בציר FF הלחץ מירבי על המערגלות (איור ג3).

נימצא כי ככל שקוטר הגליל שבא במגע עם החומר קטן יותר, ניתן לקבל עובי סופי של חומר קטן יותר. עובי זה נמצא ניסיונית מתאים למשוואה:

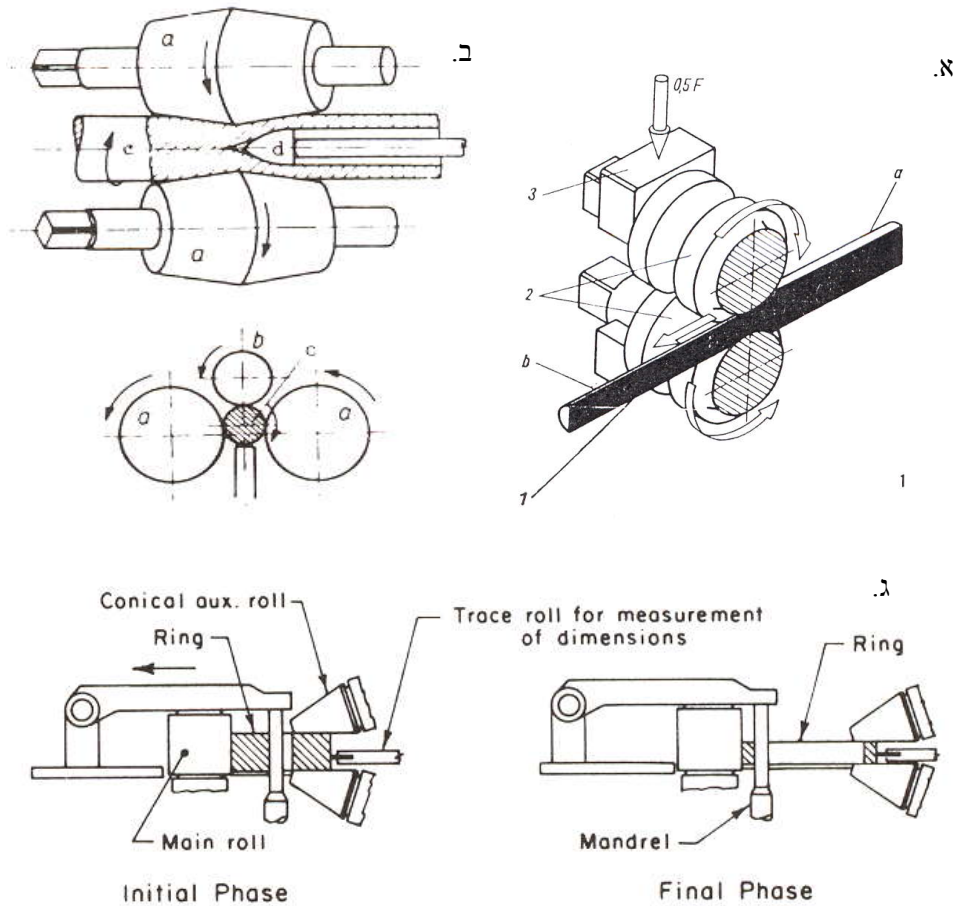
$$t_{min} = \frac{3.6 \mu D \sigma_{yp}}{E}$$

כאשר μ הוא מקדם החיכוך, D קוטר הגליל, σ_{yp} מאמץ הכניעה של העובד ו-E מודול יאנג שלו. אולם קוטר גליל קטן משמעותו מאמצי כפיפה גבוהים בגליל, דבר המחייב תמיכות לגלילים ולכן נבנו סוגים שונים של מכונות ערגול.



איור 5. עיקום של המערגלות כתוצאה מעומס גבוה.

למעשה, ערגול הינו טכניקה המשמשת בו זמנית לעיצוב צורתו של החלק ולשינוי תכונותיו המכאניות. לוח המתכת נלחץ בין שני גלילים כבדים של מתכת בעלת חוזק וקשיות גדולים יותר ועובר עיבוד פלסטי. בגלל הלחץ הלוח נמעך ונעשה דק יותר בהתאם למרחק בין הגלילים. ניתן לייצר בערגול צורות שונות: מוטות, צינורות, לוחות, פחים, סרטים. הצורות השונות מתקבלות בהתאם לצורות גלגלי הערגול (איור 6).



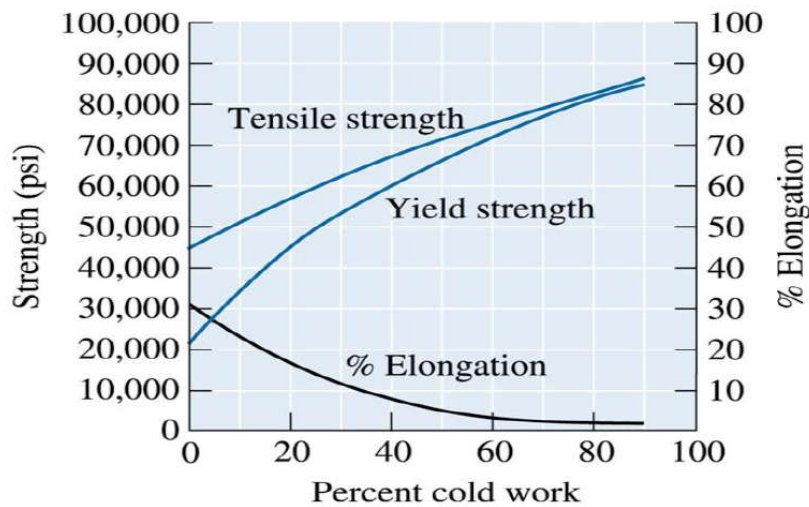
איור 6. צורות שונות של ערגול ליצירת פרופילי ערגול שונים; א. יצירת חצי מוט, ב. צינור, ג. יצירת טבעת.

מבחינים בשני סוגים עיקריים של ערגול – ערגול חם וערגול קר. בשיטה הראשונה מחממים את החומר עד לטמפרטורה של $0.45T_m$ ומערגלים אותו בגלילים קרים או מחוממים. בשיטה זו מערגלים גושים גדולים בדפורמציות גדולות. שיטה זו נפוצה בתעשייה לערגול ראשוני של גושים הבאים מתנורי היתוך או לחומרים פריכים.

ערגול בקור משמש לערגול סופי של מוצרים בהם נדרש טיב פני שטח מעולה ודיוק עובי מקסימאלי. ניתן לקבל בערגול בקור חומרים בעלי תכונות חוזק שונות עקב הקשיית עיבורים המתרחשת בתהליך. הקשיית העיבורים נקבעת על פי דרגת העיבוד בקור CW:

$$CW = \left[\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right] \times 100$$

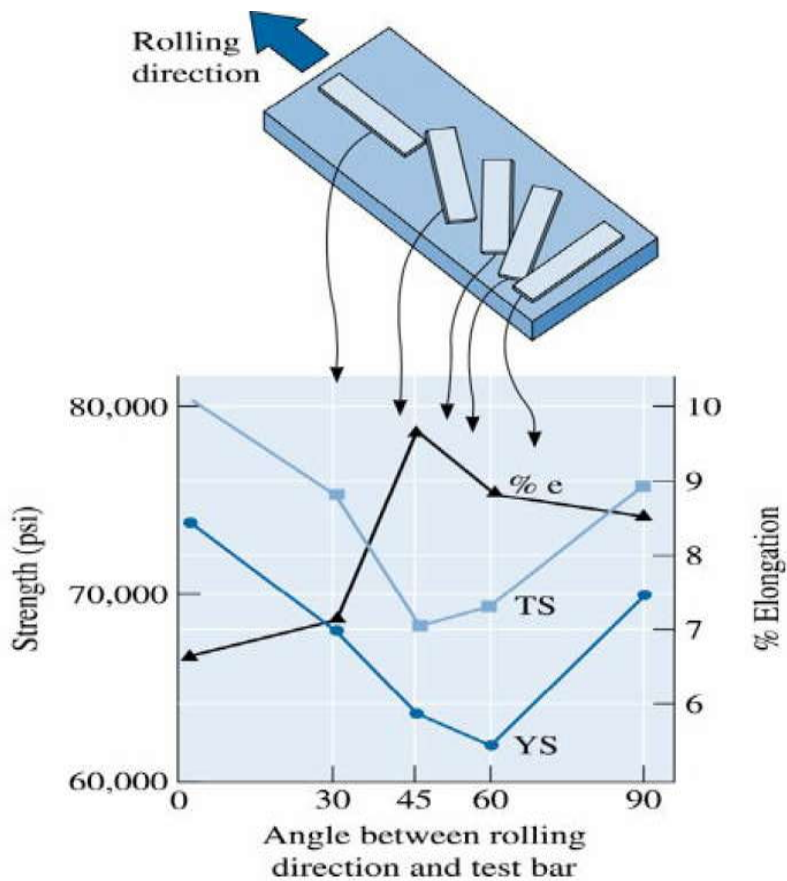
כאשר A_0 ו- A_f הם שטחי החתך התחיליים והסופיים של העובד, בהתאמה (איור 7).



איור 7. שינוי התכונות המכניות כתלות בדרגת העיבוד בקור.

- קצב העיבור בתהליך הוא מהיר וכך גם קצב הקשיית העיבורים.
- במרבית המקרים נדרש ריפוי בין המעברים בערגול – כדי להשיב את המשיכות.
- מיקרו-המבנה של החומר שמתקבל הינו של גרעינים מאורכים בכיוון זרימת המתכת.
- התכונות המכאניות אינן אחידות בכל כיוון. להומוגניות במיקרומבנה ובתכונות נדרש לבצע ריפוי (איור 8).

הדפורמציה הפלסטית בערגול משפיעה על מיקרו-המבנה וגורמת לגרעינים להיות בכיוונית קריסטלוגרפית מועדפת המקבילה לכיוון העירגול ולמישורים קריסטלוגרפים להופיע באופן מועדף במקביל למישור הערגול. במספר מתכות בעלות מבנה FCC מירקם הערגול העיקרי הוא $[112]$, (110) , כלומר שמשפחת המישורים $\{110\}$ יסתדרו במקביל למישור הערגול ואילו משפחת הכיוונים $\langle 112 \rangle$ ימצאו במקביל לכיוון הערגול. הטבלה להלן, מתארת את הטקסטורה (מרקם) של מתכות אחדות במושגי כיוונית מועדפת לאחר עיבוד בקור כתלות במבנה הגבישי ובסוג העיבוד הפלסטי.

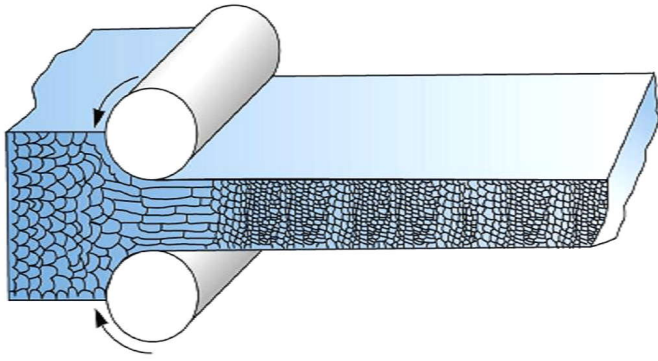


איור 8: שינוי בכיווניות כתוצאה מערגול והשפעתו על התכונות המכאניות.

Crystal Structure	Mode of Working	Texture
fcc	Wire drawing and extrusion	$\langle 111 \rangle$ $\langle 100 \rangle$ Parallel to wire axis
bcc	Wire drawing and extrusion	$\langle 110 \rangle$ Parallel to wire axis
hcp	Wire drawing and extrusion	$\langle 10\bar{1}0 \rangle$ Parallel to wire axis
fcc	Rolling	$\{110\}$ Parallel to rolling plane $\langle 112 \rangle$ Parallel to rolling direction
bcc	Rolling	$\{001\}$ Parallel to rolling plane $\langle 110 \rangle$ Parallel to rolling direction
hcp	Rolling	$\{0001\}$ Parallel to rolling plane $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ Parallel to rolling direction

איור 9: סוגי מרקם נפוצים לאחר ערגול.

בדפורמציות גדולות נגרמת בחומר עלייה בטמפרטורה שעשויה לגרום לרקריסטליזציה דינאמית. בתהליך זה ייווצרו גרעינים קטנים, בכל החתך או בחלקו (איור 10).



איור 10. רקריסטליזציה דינאמית.

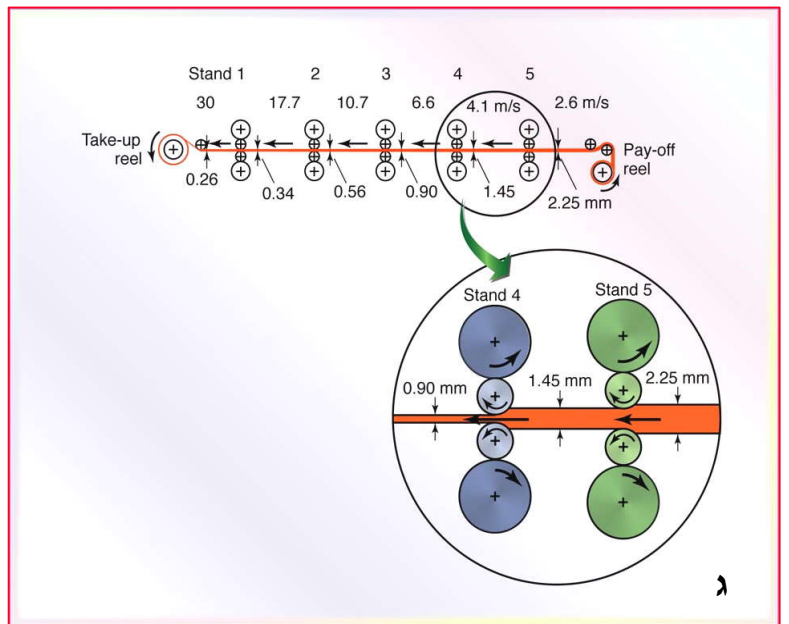


א

איור 11. (א) מערכת מעבדתית
(ב-ג) מערכת עירגול תעשיתי.



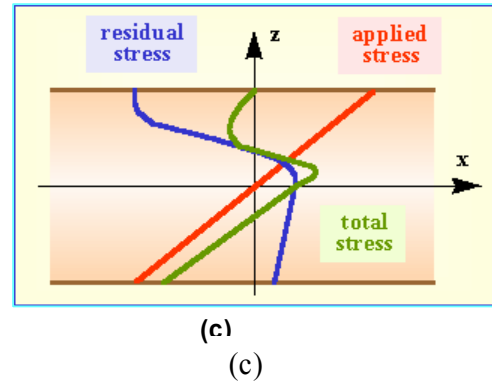
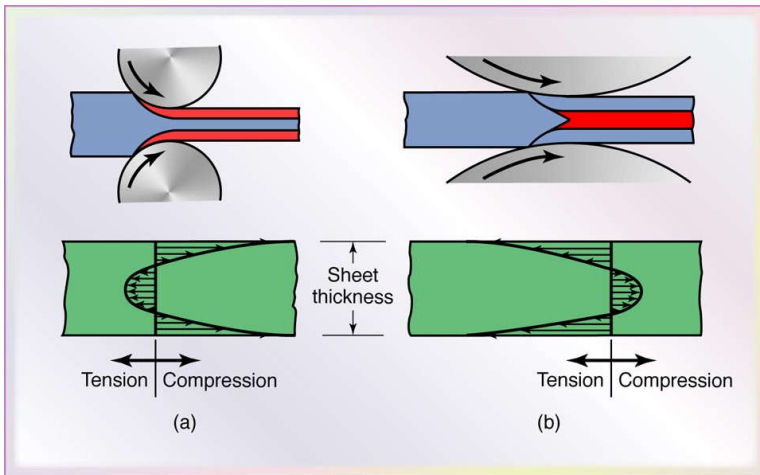
ב



ג

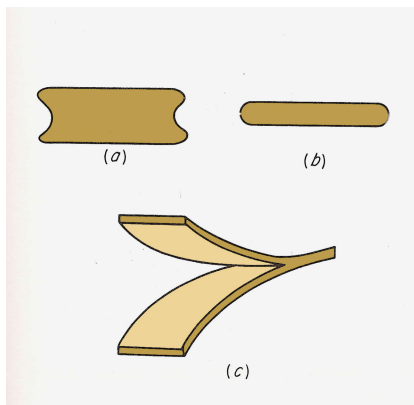
3. פגמים ומאמצים שיוריים כתוצאה מערגול

מאמצים שיוריים הינם, בדרך-כלל, תולדה של דפורמציה לא הומוגנית במהלך העיבוד בקור. בדרך כלל יוצרו מאמצי לחיצה בכיוון הערגול בשכבה שעברה את מידת הדפורמציה הגדולה יותר. כשדרגת הרדוקציה קטנה או קוטר המערגלות קטן מתקדמות שכבות הגרעינים הסמוכות לפני השטח במהירות גבוהה יותר מאלו שבשכבות הליבה. הגרעינים בפני השטח יקבלו דפורמציה גדולה יותר ולפיכך, יתארכו יותר מאלו שבשכבות הפנימיות. אם החומר שומר על רציפות, גרעינים שיתארכו במידה גדולה יותר יילחצו על ידי שכבות הגרעינים הסמוכים להם – שנמתחו פחות במהלך הערגול. דהיינו, זרימה מהירה בפני השטח תוביל להיווצרות מאמצי לחיצה בפני השטח (איור a, C12). כשדרגת הרדוקציה גדולה או קוטר המערגלות גדול מתקדמות שכבות הליבה במהירות גדולה משכבות השטח. עתה יוצרו מאמצי לחיצה שיוריים בליבה ומאמצי מתיחה בפני השטח (איור b12).



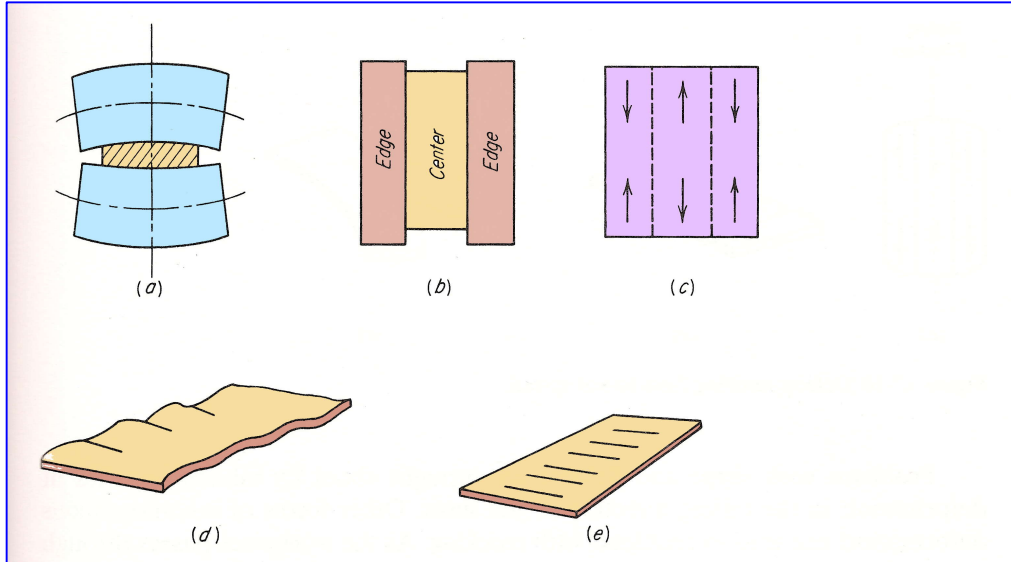
איור 12. מצב המאמצים השיוריים לאחר עירגול בתנאים שונים; (a) עומס נמוך; (b) עומס גבוה. (c) פילוג מאמצי לחיצה שיוריים עשוי להועיל לעמידה של החומר במאמצים חיצוניים

רדוקציה גדולה או קוטר מערגלות גדול שגורמת לדפורמציה גדולה של הליבה ניתנת לאבחנה בצורת החתך של העובד (איור b13). מאמצי מתיחה שיוריים בפני השטח עלולים להוליך לעיוות הלוח המעורגל ולפתיחה דמוי לוע-תנין (איור C 13).



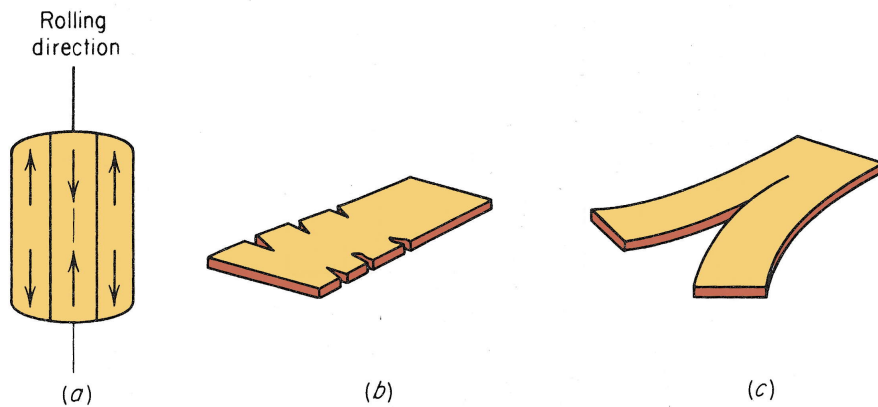
איור 13. צורות אפשריות שונות של העובד לאחר תהליך ערגול לא מוצלח.

הכפיפה של המערגלות שתוארה באיור 5 עלולה לגרום להבדלים במהירות הזרימה של העובד לרוחבו. זרימה מהירה בצידי העובד תגרום למאמצי לחיצה שיוויים בצדדים שיגרמו לסידוק או לפיצול (איור 14).



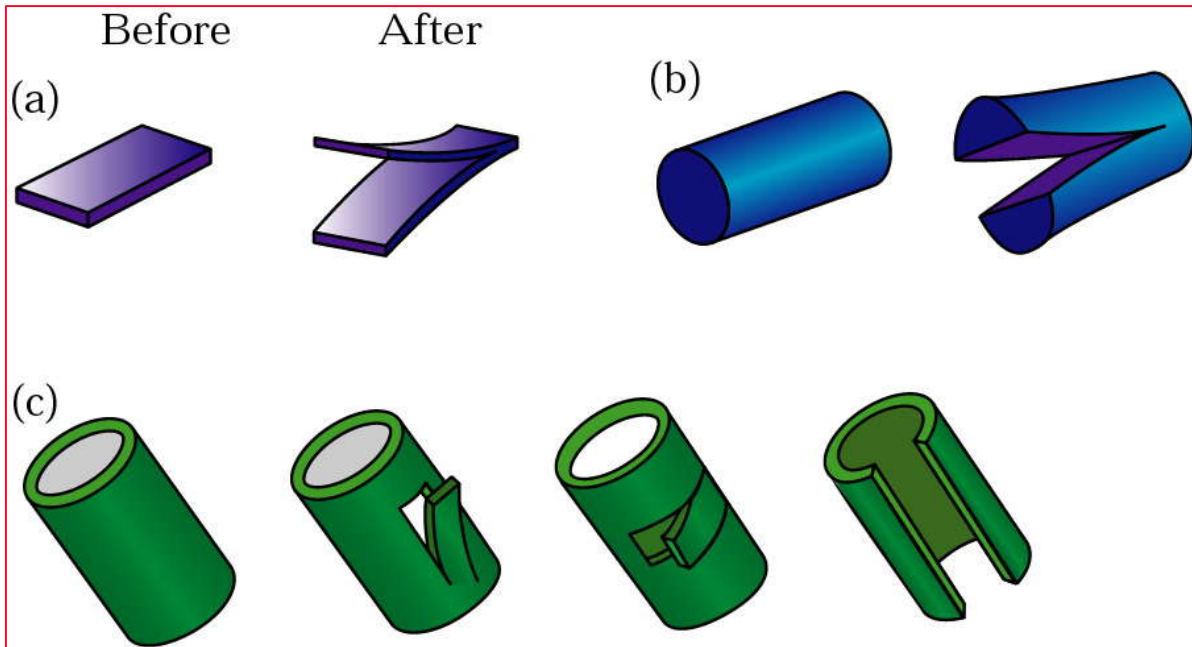
איור 14: פגמים בחומר מעורגל כתוצאה מדפורמציה אורכית גדולה בצדדים

כאשר המערגלות מקבילות יתכן שהזרימה במרכז העובד תהיה מהירה מצדדיו ואז יוצרו מאמצי מתיחה בצידי העובד. אלה עלולים לגרום לסידוק או לפיצול (איור 15).



איור 15: פגמים בחומר מעורגל כתוצאה מדפורמציה אורכית גדולה במרכז

לבסוף, א. מאמצים שיוריים עלולים להתגלות רק בעיבוד שבבי של חומר מעורגל, אחרי ששכבה מאומצת בכוון מסויים מוסרת בעיבוד השבבי (איור 16).
 ב. מאמצי לחיצה שיוריים עשויים להיות מועילים בשירות, למשל בתנאי התעיפות (איור C12).



איור 16: עיוותים בחומר מעורגל לאחר הסרת חומר בעיבוד שבבי, כתוצאה מהפרת המאזן של המאמצים שיוריים

4. מהלך הניסוי

הניסוי יערך בחמישה פסי נחושת שעוביים 2 מ"מ ורוחבם 12 מ"מ.

- מדידת מימדים התחלתיים של פסי הנחושת
- עירגול ארבעה פסים במעבר יחיד לעוביים שונים: 1.1, 1.3, 1.5, 1.8 מ"מ.
- בדיקת קושי של כל הדגמים
- הכנת דגמי מתיחה וביצוע ניסוי מתיחה עבור כל הדגמים.

5. שאלות לדו"ח מכין

- 5.1 מהו תהליך העירגול? תארי את התהליך והשפעתו על החומר המעובד?
- 5.2 מהי איזטרופיה? מהי תכונה איזטרופית ואנאיזטרופית? מדוע חד-גביש יהיה אנאיזטרופי ואילו אותו החומר בנוי כרב-גביש יפגין תכונות איזטרופיות.
- 5.3 באילו פרמטרים יש להתחשב כאשר מעבדים את החומר בתהליך הערגול?
- 5.4 אילו פגמים ייווצרו בחומר שעבר ערגול?
- 5.5 הסברי מנגנוני דפורמציה פלסטית בחומר שעובר ערגול?
- 5.6 תן שיטת עיצוב פלסטי נוספת וערוך/י השוואה

- יש לרשום מקורות בדוח המכין.
- במהלך המעבדה נבצע ניסוי מתיחה וקושי לדגמים, לכן מומלץ לחזור על החומר.

6. מקורות:

1. W. D. Callister, *Materials Science and Engineering, An Introduction*, Wiley&Sons 2005.
2. D.R. Askeland, *The Science and Engineering of Materials*, , Chapman&Hall 2005.
3. G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, , McGraw-Hill, 2000.
4. Kalpakjian and Schmid, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, , Prentice Hall, 2003

