

עיצוב בלתי שבבי של פחים

1. מטרת הניסוי

1.1 הכרת תהליכי חיתוך ומשיכת עמוקה של פחים

1.2 ניסוי ארליקסון

1.3 ניסוי משיכת כוסית

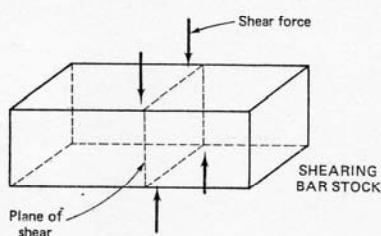
1.4 כווניות מודעתת ואנאי-וטרופיה בתוכנות לאחר עיצוב פלסטי

2. מבוא

תהליכי עיצוב של פחים הם מהתהליכים השכיחים והומולטים בטכנולוגיה של מתקנות וחומם מהווים דוגמאות מעניינות לניצול התכונות הפלסטיות של מתקנות. אפשר לסוג אותם לתהליכי חיתוך, עיצוב ומשיכת.

2.1 חיתוך

התהליך האידיאלי של חיתוך פח הוא גזירה על ידי כוחות שווים ומוגדים (איור 1).



איור 1: כוחות גזירה

מעשיות האופן שבו פח נגזר תלוי מאוד במרווח בין שני הכוחות הנקבע על פי הפרש הקטרים בין הטעב לתבנית. הפרש זה נקרא אפיזות (clearance). אם האפיזות גדולה מדי הפח מתקוף לרדיוס הטעב ומיגע למצב אנכי במרווח בין הטעב לתבנית. רידית הטעב תוגרום לפחות במתיחה (איור 2).

כשהאפיזות הדוקה יותר והכלים חדים – שולי הפח יתקבלו חדים יותר, כמפורט באיור 3.

מבחנים בשולי הפח באربע אוזרים: קפל, אзор ליטוש, שבר וויז.

א. אזור הקפל – שנובע מזרימת המתקת לתוך המירוח בין הטעב לתבנית.

ב. אזור ליטוש – נוצר משפשף הפח עם הטעב.

ג. אזור השבר – חיתוך הפח גורם על ידי שבר. נזקם אחר היוצרים השבר באמצעות

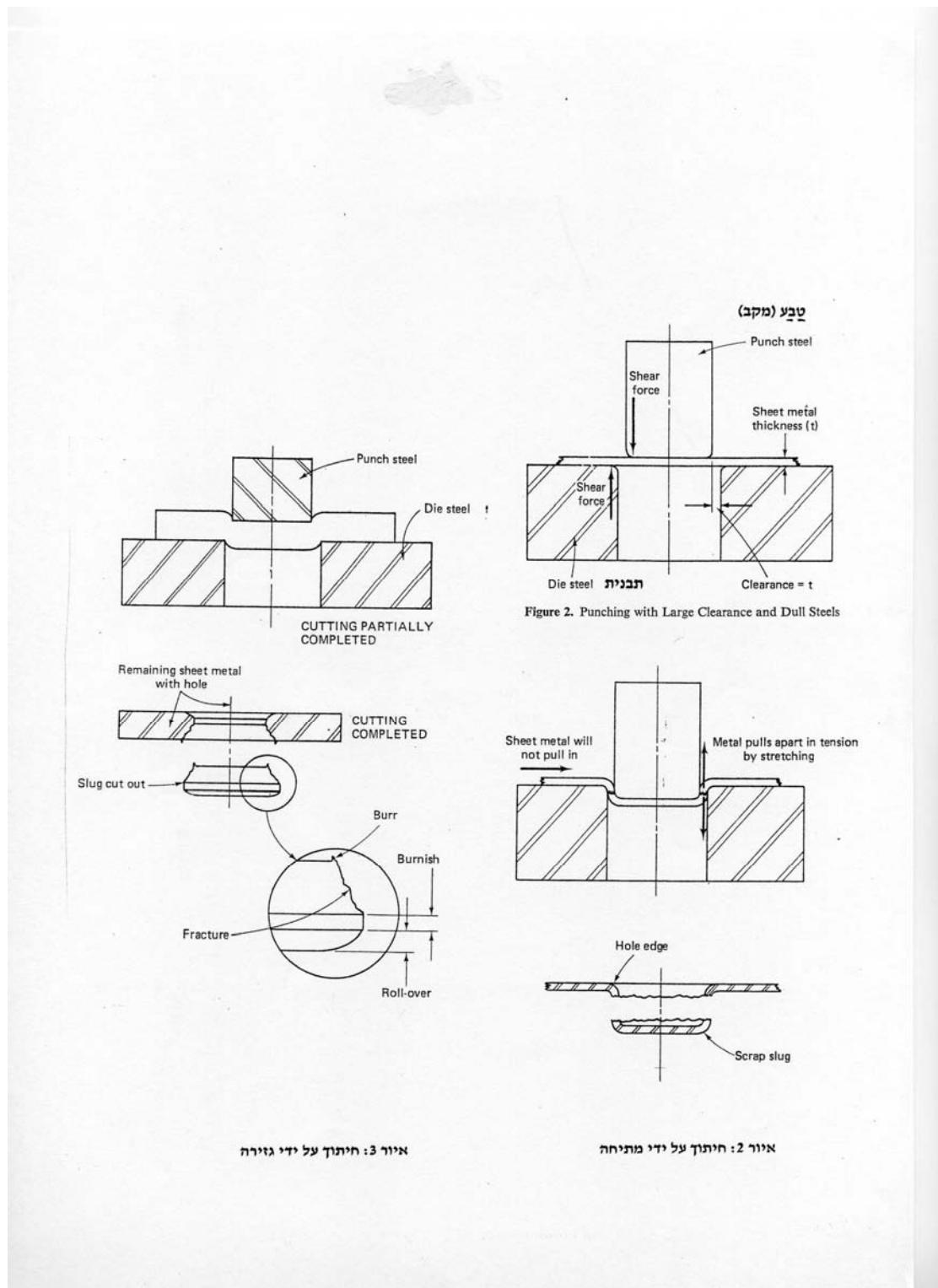
טולוגרפיה (איור 4). באיור 4א' הטעב חדר 0.01 לפלח (שעובי 0.375"). מבחנים סביר

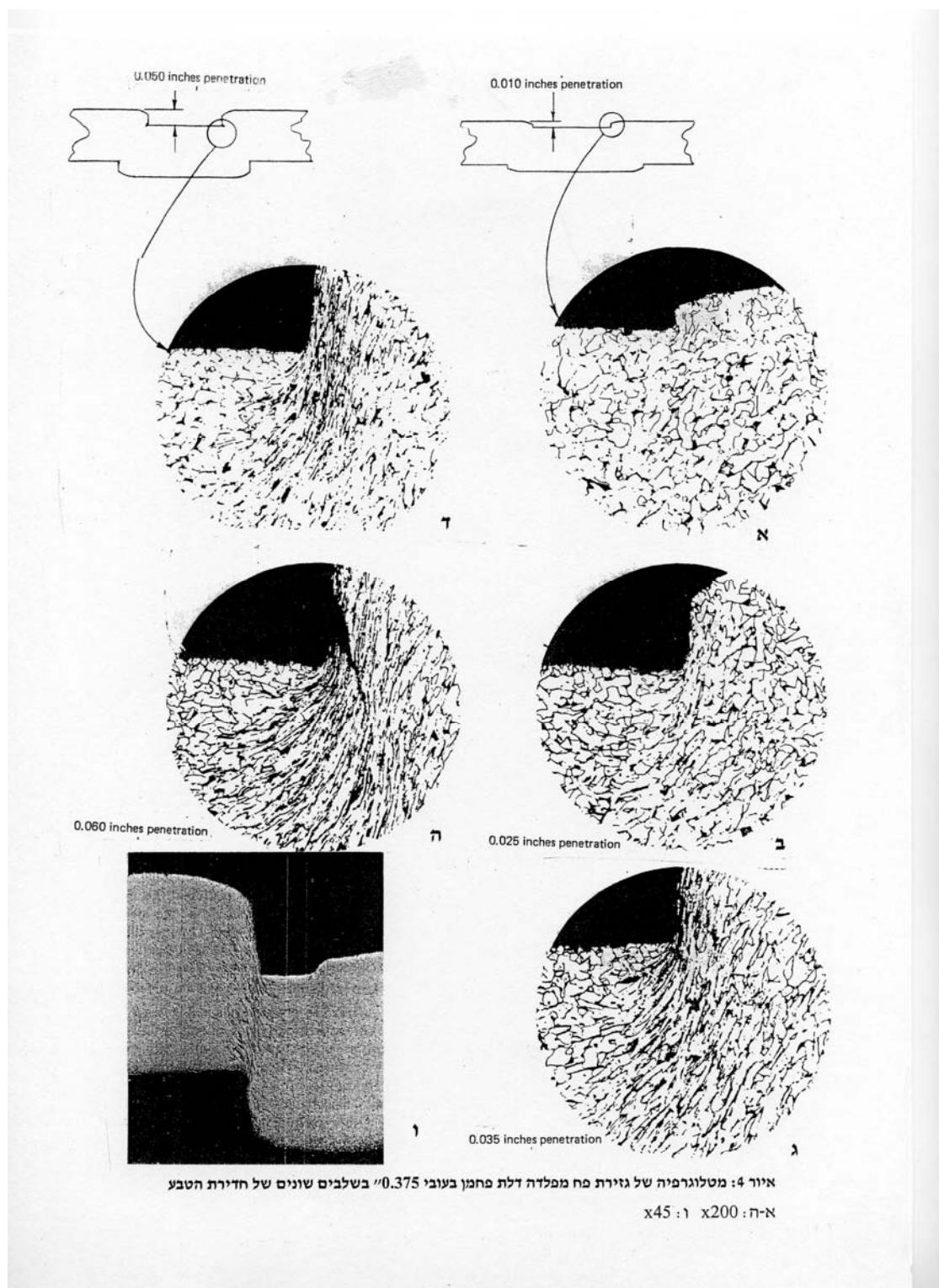
הקפל ואזור הליטוש. שניים ברורים יותר באיור 4ב', לאחר חזרה של 0.025". הגראניים סביר

קשה הטעב מאורכים מעט אך לא כל כל שינוי במבנה בשטח שמתוחת לחלק היישר של הטעב, כי

שניהם נעים יחד למיטה. שים לב שסדק החל רק באיור 4ד', כשהטעב נמצא בעומק של 0.05".

איור 4ה' הסדק התקדם מטה, שם הוא יפוגש עם סדק אחר שמתחיל בקצה התבנית. התמונות מראות שהגרעינים מאורכים מאוד ולכן הסדק הוא למעשה סדק מתיחה.

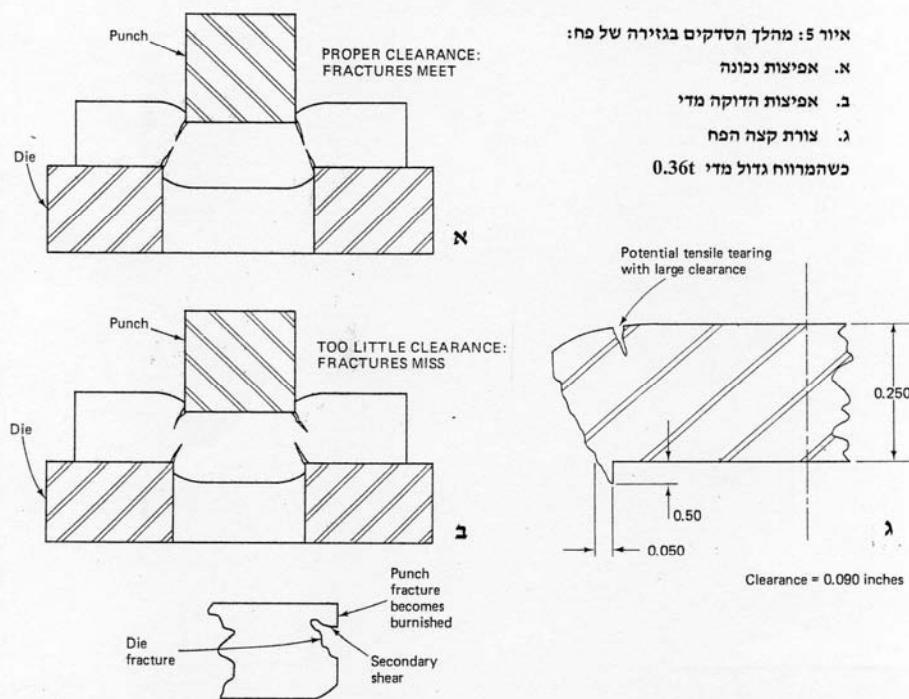




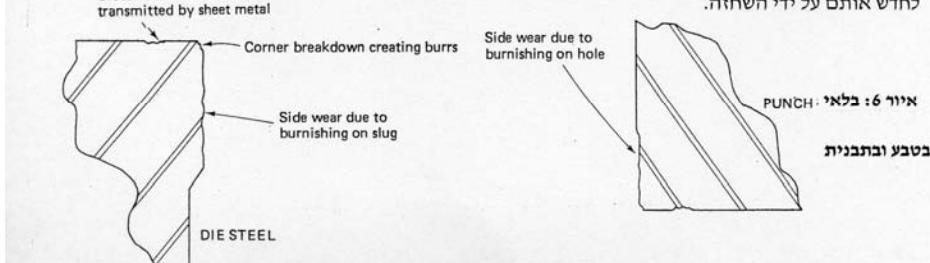
איור 4: מטלוגרפיה של גזירות פח מפלדה דלת פחמן בעובי 0.375" בשלבים שונים של חדירת הטבע

א-ה : x200 1 : x45

שני הסדקים שנוצרים ליד פינות הטעב והותבנית נפגשים ויוצרים שבר כשהמרוחה בין הטעב לתבנית נמaja בתחום $0.10t - 0.15t$, כאשר הוא עובי הפח הנזר. כשהמרוחה קטנה יותר, נגרמת "גזירה מישנית" המווארת באירט 5. במקרה זה שני הסדקים לא נפגשים ושפפת החותק אינה חדה. חומר נספף צריך ליהקרע כדי להשלים את החיתוך, ונדרש כוח נספף לחיתוך. כשהמרוחה גדולה מ- $0.15t$ אזור הקפל גדול ומשתכת נמotaת שם מעלה לחזוק המותיחה שלה עלולים להופיע שמש סדקים משניים – ומולם זו גדול ד. זין או שבב – הוא בליטה חדה שנוצרת כשڪוזות הכלים אינם חדים ואו הסדק נוצר מעלה למקומו הרגיל (באיור 4ה'). במתכוות מישיכות נוצרים זווים בולטים יותר.

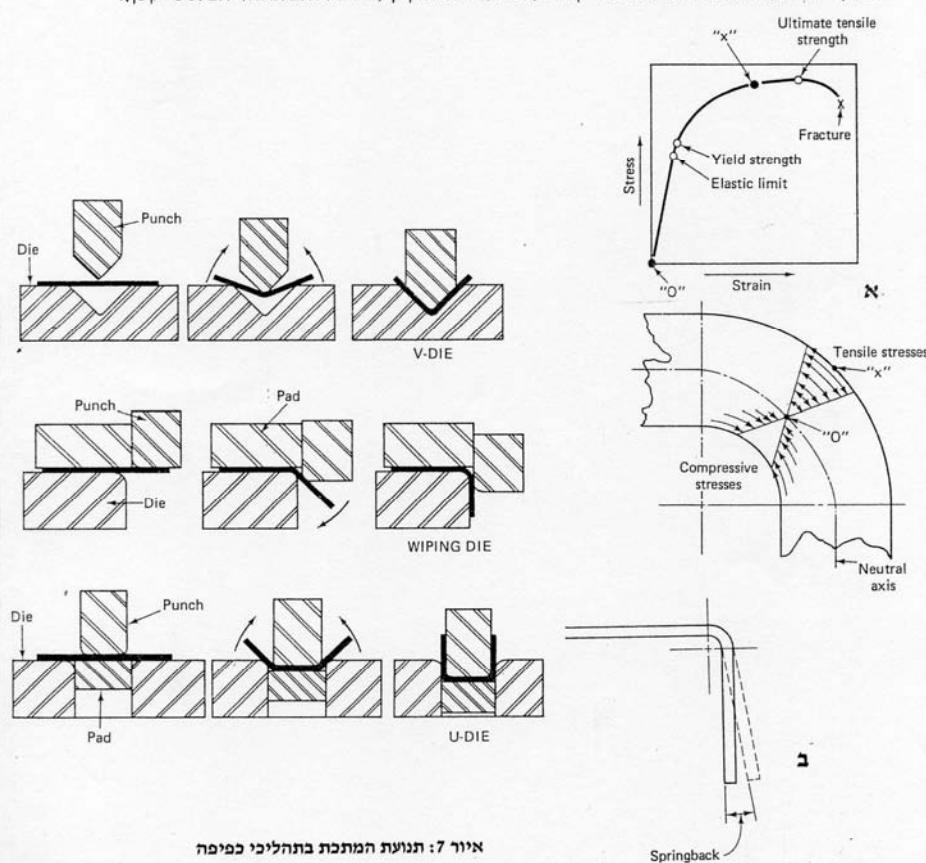


הטעב והותבנית ניזוקים ממשך הזמן באופן דומה, כמוואר באירט 6. בוגבלות מסוימות ניתן לחדש אותם על ידי השחזה.



2.2 עיצוב על ידי כפיפה

כפיפה של פחים מותבצעת על ידי טבע (punch) ותבנית (die) המפעילים כוחות בכוכנים מנוגדים על הפלט (blank, sheet, plate) (איור 7). מאמצעים נוצרם בפה רק סביר רדיוס הכיפוף. בצד החיצוני של רדיוס הכיפוף המותכת נמתחת בתחום הפלסטי, בצד הפנימי המותכת נלחצת בתחום הפלסטי וכן בניהם נמצא מישור נטרלי חופשי ממאמץ וסביבו אזור אלסטי (איור 8א). כשמחלצים את הפלט מהתבנית האזור האלסטי מסתוזר לחזרו למצבו המקורי, אך נתקל בהתנגדות של שני האזוריים סביבו. שלושת האזוריים מגעווים לשווי משקל בו האזור החיצוני נלחץ מעט והאזור הפנימי נמתחה. במראה הכלול הפלט נואה ווועט לאחר מכן (spring back). הרתיעה האלסטית נדלה כאשר מכמאנץ הכנעה של החומר גדל (כי איז האזור האלסטי גדול), כשרדיוס הכיפפה גדל (כי איז המכאניצים באזורי הפלסטי קטנים) וכשעובי הפלט קטן (כי איז רוחב האזור הפלסטי קטן).



איור 7: תנועת המותכת בתהליכי כפיפה

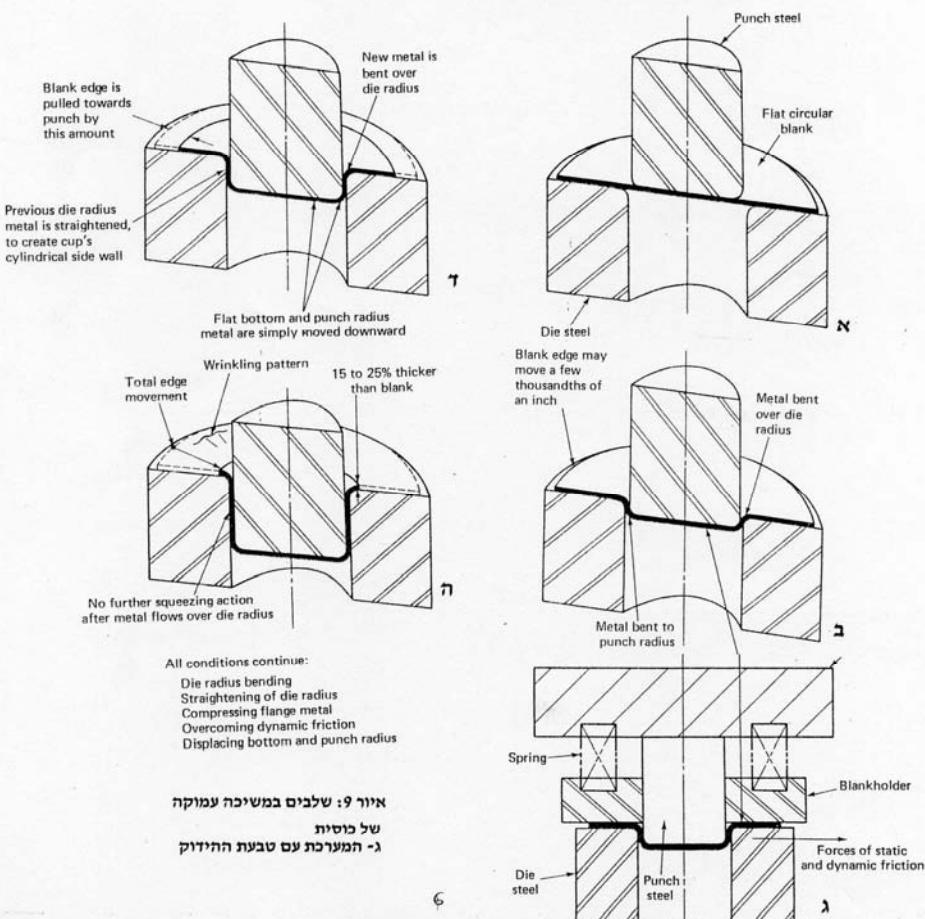
איור 8: א. פילוג מכאניצים באזורי הכיפוף
ב. רתיעה אלסטית

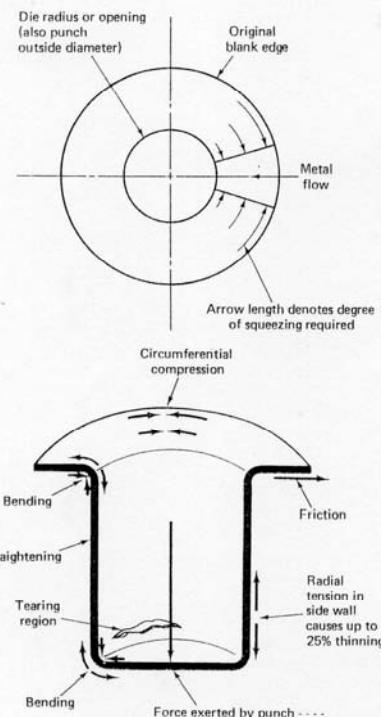
2.3 משיכת עמוקה

משיכת עמוקה היא התהליך המורכב ביותר של עיצוב חדים. תהליך של משיכת כויסית מפח בגורת עיגול מתואר באירוע 9. אירוע 9א' מתאר את המגע הראשוני בין הטבע לפח. באירוע 9ב' הפח כפף לדידיות הטבע. החלק שמתוחת לטבע הוז למטה עם הטבע וצורתו לא משתנה בתהליך. העיצוב מתרחש בכפיפה כמו בסעיף 2, מכיוון שהכוח הנדרש לכפיפה הוא קטן מאוד. אם הפח מוחזק באופן קשיח בהיקפו – הוא יגור.

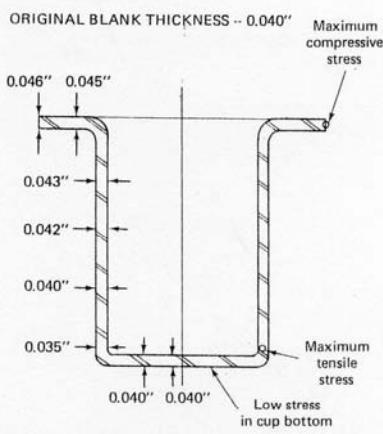
המתקפת שכופפה תחילת סביבת רדיוס הטבע ישרה בשלב הבא, המתואר באירוע 9ג'. חומר זה הונקסה בשלב הכפיפה لكن עתה דרוש כוח גדול יותר לשירותו. חומר חדש כופף סביב רדיוס התבניות.

באירוע 9ד' קצוות הפח או היקפו נמסחים אל הטבע (מכאן שם התהליך). תנועה זו מתרחשת כנגד חיכוך עם התבניות וטבעת ההידוק. משתמשים בכך כל בחומרי סיכה כדי להקטין את הכוחות הדרושים, את הבלאי לכליים ואת הסכנת שփוף יקרע.





איור 10: פילוג המאמצים במשיכת כוסית



איור 11: פילוג עובי בкосית שיוצרה במשיכת עמוקה

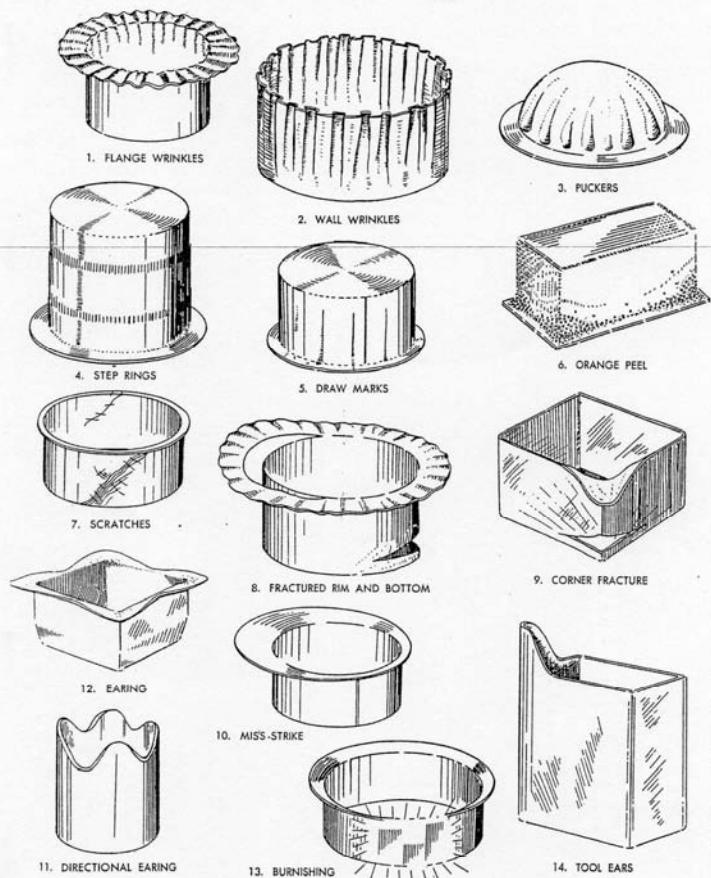
נסכן ב- r_o את מוחג הטבע או את מוחג הcoresitic שבכוננותינו למושך. כל מעגל שישורט על הפה

לפני המשיכה ייחסק למעגל בעל מוחג קטן יותר r (איור 10). פירוש הדבר שהחומר על פני המمعالג
(בחייך הפה) נלחץ. עיבור הלחיצה בمعالג שמוחגו r הוא:

$$\epsilon_{\theta\theta} = \frac{2\pi r - \pi r_o}{\pi r} = 1 - \frac{r_o}{r} \quad (1)$$

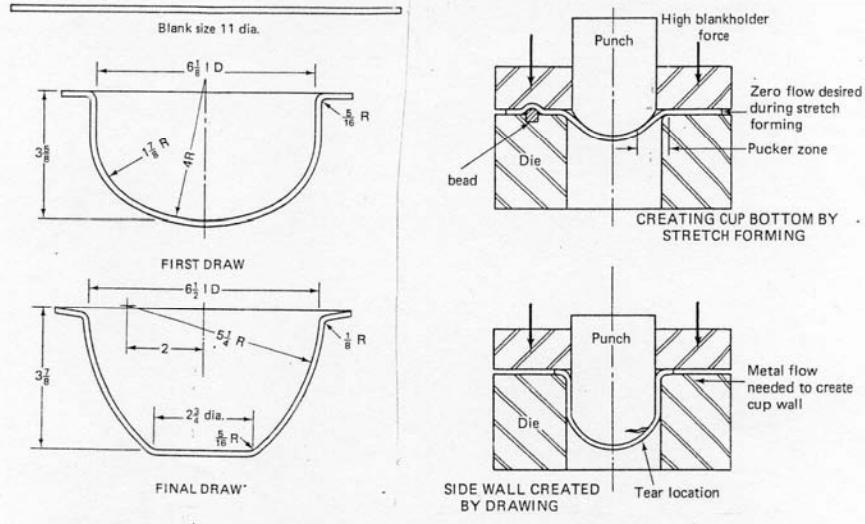
המשועחה מראה שמידת הלחיצה דלה ככל שמרתחקים ממוכנו הפה או ממוכנו הטבע. במצב זה
שתי תוצאות מעניינות וחשובות:

- א. כרגול, עובי הפה ודלת כל שמרתחקים ממוכנו (איור 11).
 - ב. תקלת אופיינית למשיכת עמוקה היא התפתחות פרופיל גלי (wrinkels) (איור 12א).
- כל שהלחיצה של בטעת ההידוק תנצל – הגליות תקטן. היא קטנה גם כשבוי הפה גדול.
המטרה העיקרית של המשיכה העמוקה היא להוציא את המרכז לצורה עמוקה, בלי ליצור גליות.
פעולת המשיכה נוצרת על ידי הטבע שודך את החלק השטוח שלcoresitic. דופן הצד מעבירה את
הכוח אל אורי הרכיפה, היישור והחיכוך. כל שפה כניסה עמוקה יוצר לבונתי, המקומות של הפעלת
תקיר הצדדי נוצב מצב של מותיחה נמרצת. בגלל המותיחה עובי הפה קטן וhape עלול להיקרע לעיד
רדיס לטבע. סיקום המאמצים בפה שנמשך לכוסית מתואר באיור 10.



איור 12: פגמים אופייניים במשיכת عمוקה

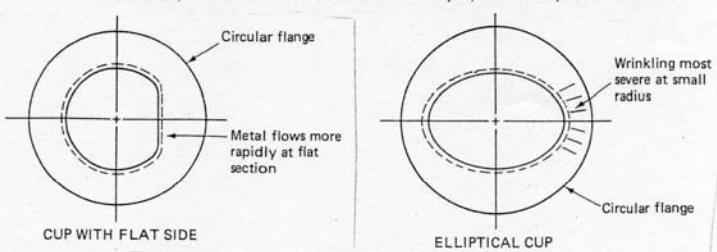
עיצוב כוסית שקרענית כדורי היא מרכיב יותר. לצורך זה משתמשים בטבע שצורתו חצי כדורית (איור 13). בתחילת המשיכת קרענית הcosaite מעוצבת במתיחה על פין הטבע. פגיעה המתייחסת למשיכת פין שפה נמשך מתחת לתבעת החdisk. הכוח בתבעת צריך להיות גדול בהשוואה למקרה של כוסית רגילה, אחרת יוציאו גלים בחלק הדרומי של הcosaite. כוח זה מגביל את עומק המשיכת. עובי הפח דק ביותר בתחלת הדרום ושם גם קיימת סכנת קריעת כוסית כדורי שקרענית שטוחה מעוצבים בשני שלבים (איור 14).



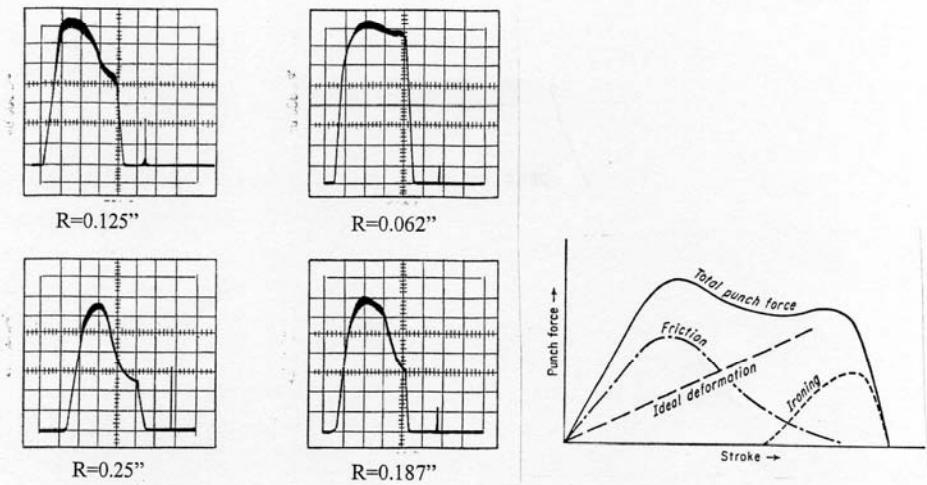
איור 14: עיצוב כוסית כדורי בעלת רצפת שטוחה
באמצעות שני טבעים

משיכת צורות לא סימטריות מחייבת תכנון מיוחד המותכת לעבר הטבע איינה אחת. איור 14' מתאר כוסית אליפטית. כוחות הלחיצה גדולים ביותר בחלק בו המותכת נדחשת לעיבור גדול ביותר שהוא האזור מול הרדיוס הקטן, על פי משועחה (1). באון מול הרדיוס הקטן יוציאו גלים ומתחחים בכוסית - יש סכנה לקרעים.

באיור 14'b מתוארת כוסית עם משטח ישר. מול משטח זה המותכת לא צריכה להידחס ולכן היא זוורמת מהר בעקבות הטבע, אך מאותה סיבה עלולה להיווצר דופן רפוייה.



איור 15: משיכת כוסיות לא סימטריות



**איור 16: מרכיבי הכוח למשיכת עומקה
עם רדיוס הטבע**

מהלך הכוח הדרוש בתהליכי משיכת קובע את העבודה הנדרשת לתהליכי, את הבלתי לכלים וגם עשוי לשמש אמצעי אבחנה של אופי התהליכי ולמנוע תקלות. כלית, הכוח החיצוני הוא סכום הכוחות הדורשים לדפרמציה של המERICA, להתגבר על החיכוך (בעיקר בין חוף לטבעת החיכון) ול"גיהוץ" החוף בין הטבע לטבנית (נדרש לאחר שובי החוף גדול) (איור 16).

משתני התהליכי: נמיינו על פי השלב בתהליכי עליו חמש פניות:

a. **כפיפה ווישור** – תלויים ברדיויסיט של קצחות הטבע והטבנית. ככל שהרדיויסיט קטן – הכוחות הדורשים לעיצוב גדלים וגדלה הסכנה לקבלת גליות באוגן. השתנות מהלך הכוחות בתלות ברדיויסיט הטבע מוארה באילו 16. צורה ריבועית של מהלך הכוח מעידה שփח קרוב להקרע. בדרך כלל רצוי: $r = 4t - 10t$.

משתנה שני הוא **האפקציות** בין הטבע לטבנית. רצוי שהרווח בין חסם מסתיק גדול כדי לאפשר לפח להתחזות. אם הרווח קטן מעובי החוף – נגרם "גיהוץ" של החוכסית. "גיהוץ" משמש לעיתים לקבל עובי אחד.

b. **חיבור** – תלוי בכוח הלחיצה על טבעת החיכון, בחומר הסיכה בין הטבעת לחוף ובטיב השטח של חוף והכלים.

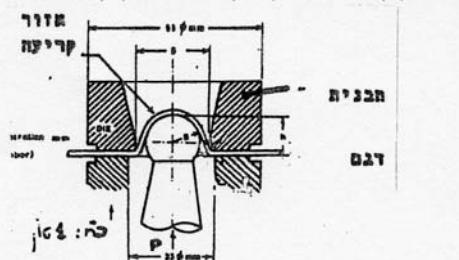
g. **כוח הלחיצה** (על הטבע) – תלוי בשיעור ההפחת הקוטר של החוף, בעומק החוכסית, עובי החוף ומאנץ הכניעה שלו בטפרטורית העיצוב.

אוסף תקלות שכיחות במשיכת עמוקה מတאור באיוו 12. אחד הפגמים המעניינים הוא תופעת ה"אווגיים" (earing) המותואר בתרשים 11. היא נובעת מהאנאייזוטרופיה בתוכנות המכניות של חומר הפה. פחיס מייצרים בערגול, במהלכו מתארכים הגורعين בכיוון הערגול גם מישורים קריסטלוגרפיים מסטדרים בכיווניות מועדף להשיג חalkה קלה. תופעת אלה גורמות בדרך כלל לחזק ולמשיכות גבוחים יותר בכיוון האורך של הערגול. בעת משיכת עמוקה החומר מגיב באופן שונה למאכעים בכוונים שונים וכן נורמות דרך כל ארבע "אווגיים" גם בשחפה התחליל הוא ערגול. התופעה מוגברת כשהשפה ערגול בקורס.

4. ניסויים להערכת כושר העיצוב של החומר (formability tests)
בניסוי מותיחה דז-צירוי מוצאים נתוני חשובים על התכונות הפלסטיות של חומרים,อลום בתהליכי עיצוב ממשיים נמצא החומר במצב מאמצעים מורכב יותר, דז-צירוי ותלת-צירוי. לחומרים שונים יכולת שונה לשאות בדפורמציה פלסטית מוגבלת כזו בלבד להיסדק. כדי לאfine את יכולת העיצוב של חומרים שונים פותחו כמה ניסויים המתקרבים לתנאי עיצוב אמתיים.

ניסוי ארכיסן (Erichsen).

בניסוי מוחזק עיגול פח בקוטר 90 מ"מ בין התבנית וטבעת האחיזה. טבע (מקב) כדורי מוטבע בתוך הפח באמצעות כוח P . מספר ארכיסן מוגדר כעומק העקבה המוטבעת, h , ברגע שמוופיע סדק ראשון.



איור 17:
תרשים של ניסוי Erichsen

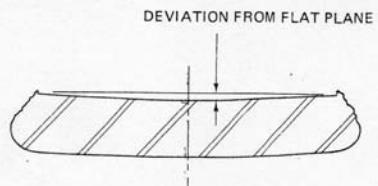
בפח הנטען לניסוי קיימים שני מצבים דפורמציה: מותיחה דז-צירית - בסביבת ראש הטעב ומשיכה - סביבת פינת התבנית. קרייה מופיעה תמיד באותו אזור קרוב לראש המקב. לכן נראה שמעצב המותיחה הדז-צירית הוא חמור יותר. אך כן, מספר ארכיסן מוגדר את התנודות החומר לקרייה כשהוא נתון במאמרי מותיחה דז-ציריים, כשהוא נמתה על כדור נתון בתנאי חיכוך מוגדרים. יש לו ערך ייחסי בלבד.

התיקן קובע את לחץ האחיזה, 1000 ק"ג, רדיוס התבנית, 10 מ"מ, קוטר התבנית, 27 מ"מ ורדיוות התבנית 0.27 מ"מ. לפני הניסוי יש למרוח שמן על הפח בתנאים מוגדרים כדי לקיים תנאי חיכוך קבועים.

בניסוי נעקוב אחר עקומות כוח המשיכה נגד מהלך הטעב. בתום הניסוי אפשר להעריך את גודל הגורעים בחומר הפח על פי חספוס פני השטח על פי השוואת לוח סטנדרטי. גם מהלך הסדק מצביע על תוכנות של הפח: קרייה משוננת מתקבלת בחומרים קשים, קרייה רדיאלית מצביעת על כיווניות מועדף של התוכנות המכניות. אפשר לבצע ריפוי וללמוד על הבדלים בקצב הגיבוש מחדש עם עצמת הדפורמציה המקומית ולבסוף אפשר לזהות הבדלים רגישות לשיטוך של חלקים שונים של הפח המשוק.

3. שאלות לדוח מכני

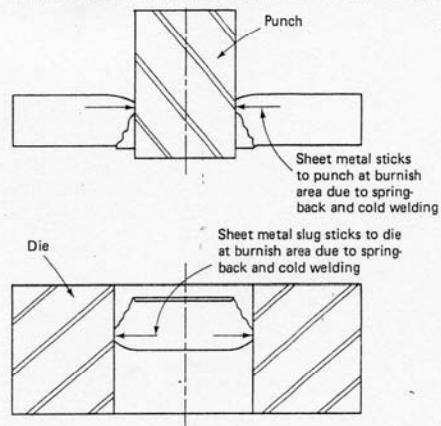
3.1 עיגול פח שנוצר בתבנית ללא טבעת אחיזה מותכוּף בדרך כלל כמוראה באירור 18. הסבר מדוע ו_hzע דרך להימנע מכך.



איור 18:

דפורמציה "צלחות" בפח גזוז

3.2 אחת הסיבות לבלאי של טבעים (אייר 6) הוא הימצאות הפח לטבע (אייר 19). הסבר את הסיבות לכך.

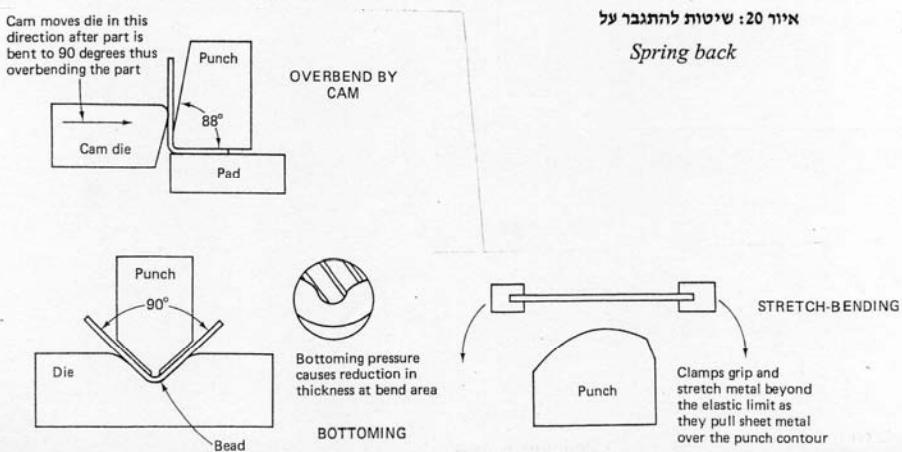


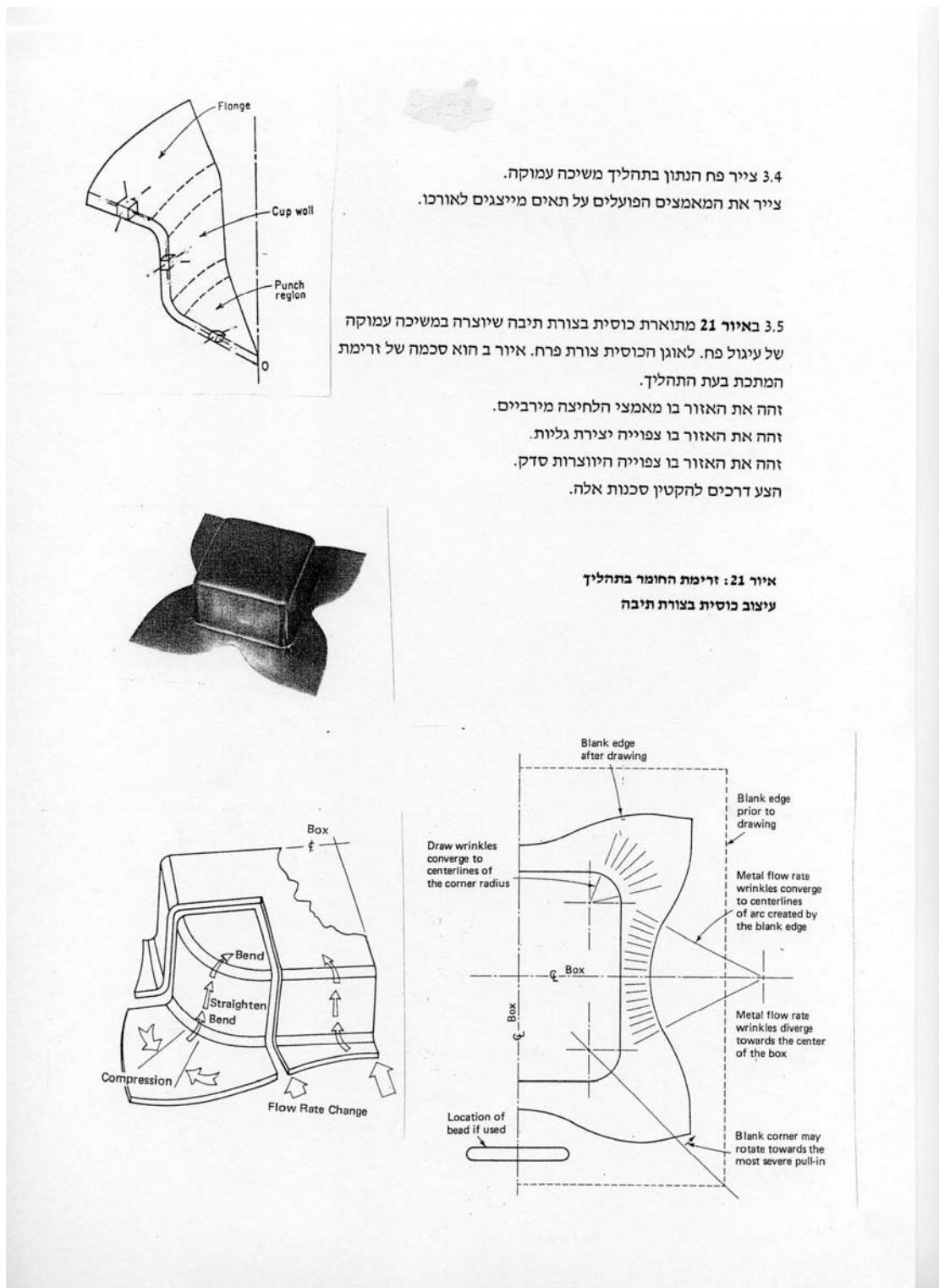
אייר 19:

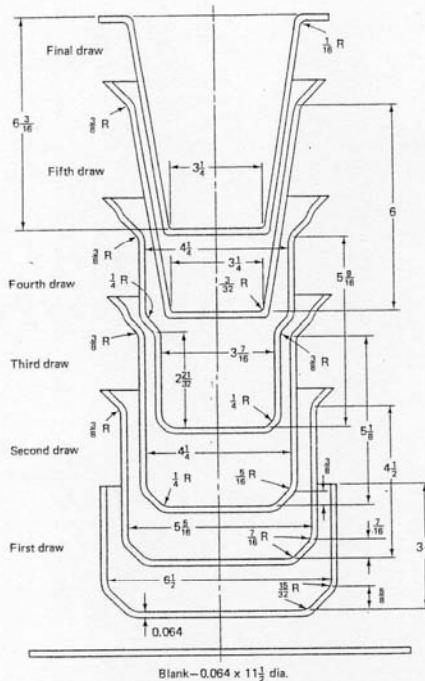
הימצאות פחים לטבע ו לתבנית

3.3 לאחר שימושים מהותניים פח שעבר כיוף – הפח רותע לאחור וזוויות הциיפוף הנותרת קטנה מהזווית שנקבעה בתבנית. הצע דרכי לוכחים לווית שבחירה מראש.

אייר 20: שיטות להטnger על
Spring back







איור 22 מראה שלבים שונים בעיצוב של כוסית בעלת צורה חרוטית. הסבר את שלבי התהילה.

מהו כוشر עיצוב ואילו גורמים המשפיעים עליו.
מהו מספר אריקסון ומה הוא מודד.

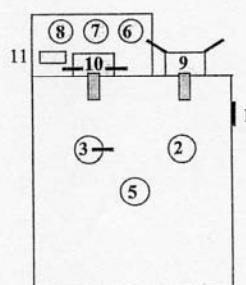
איור 22: מERICA עמוקה של כוסית חרוטית

4. מבחן ניסוי

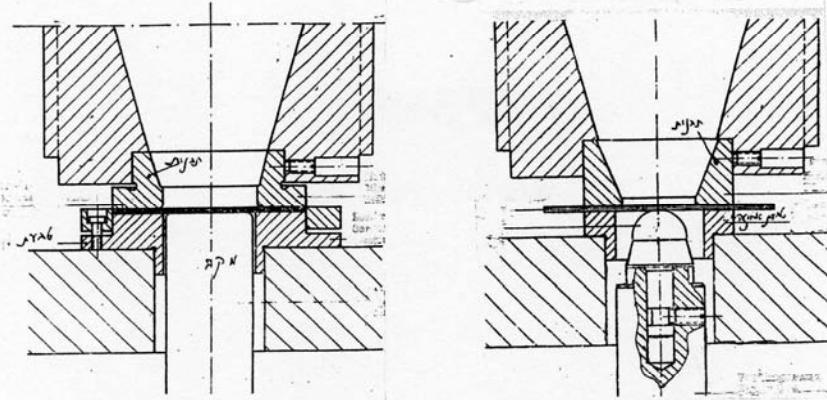
4.1 הדרת הממשיר

הממשיר לבדיקות פרטיות הוא מערכת אלקטרו-הידראולית בה נוצר לחץ על מכונה המונעת מכב על ידי משאבות שמן. הפעלה נעשית על ידי מפסק חשמלי (1), ידית של שסתום בורר (2) וידית של שסתום וסוטה זווית השמן (3). סיבוב הדידית בכיוון השעון קובעת את כמות השמן הזורמת ואת קצב המשיכה של הפע. סיבוב בזווית 90° הוא מבן המורירות המירכית. במעבר השעון הבוכנה יורדת למצבה המקורי. במצב זה נדלקת מנורה בלוח הבקרה (4). ידית שלישית קובעת את החלק על טבעת האחיזה (5).

לוח הבקרה מכיל שעון ללחץ האחיזה (6) ושני שעונים של כוח המשיכה: (7) עד 8000 ק"ג ו-(8) עד 3000 ק"ג. בממשיר 2 ראי עבדה. האחד מיועד להיתוך דיסקוט (9) שני לניסויי משיכה עמוקה (10). (11) הוא מוד התזוזה האנכית של המקים.



השרוטטים הבאים מפורטים את מבנה תבניות המשיכה העמוקה.



שרוטוטי מכונה למשיכת עומקה: א. ניסוי Erichsen ב. משיכת כויסית

4.2 חיתוך דגמים

4.2.1 חדק פח בראש החיתוך. כשהמසיר מכובה העבר את ידיית השסתום הבורר 2 למצב

Blanking, הפעל את המפסק הראשי. המקבב עלה ויחזק דיסקה.

4.2.2 העבר את ידיית 2 למצב Return. כשהובכנה תרד שחרר את הדיסקה. כבה את המפסק

הראשי 1.

4.3 ניסוי אריקSEN

4.3.2 הרכיב מכב 27-40 במתיקן המשיכת העומקה.

4.3.3 מורה בשני נזחיב את הפח בראש המשיכת העומקה 10, מרכז וצדדים.

בכוח ידי.

4.3.4 סובב את השסתום הבורר 2 למצב Cupping ושסתום הויסות 3 למצב Initial Position.

4.3.5 חברג את התבניות כ-5 מ"מ מעיל לדגס. אפס את מד התזוזה.

4.3.6 התרען את המנווע באמצעות מפסק 1.

4.3.7 קבע את לחץ החידוק באמצעות כפטור 5 ל-1000 ק"ג. הלחץ מוצג בשעון 6.

4.3.8 סובב את ידיית הויסות 3 בכוון השעון, המשיכת מתחילה. עקוב ורישום את הכוח והतזוזה ברווחים קצובים. רשות את הכוח המקסימלי ברגע שהדגם נסדק, התזזה ווזמן עד לשבר.

4.3.9 תבחן בקריעת הדגם באופן חוזטי או על ידי נפילת הכוח בשעון הלחץ. הפסיק את פעולת המנווע 1.

4.3.10 העבר את ידיית שסתום הויסות 3 למצב Return, הפעל את המפסק 1 עד שהמקבב יჩזר למצבו המקורי ונורט בקרה ירוקה תזולג. סגור את המפסק. שחרר את הדגם.

4.3.11 חזור על הניסוי אך הפסיק את המשיכת העומקה מעט לפני שנוצר סדק. הוציא את הדגם וחשווה את מרוחקו ללוח של דגמים תקניים וקבע את גודל הגורعينים בפח שקיבלה.

4.4 משיכת כיסוי

4.4.1 חתוך דיסקוט מפחית נוחותת, פלייז, אלומיניום ופלדה בעובי 1 מ"מ.

4.4.2 הרכיב מכב 1B במתיקן המשיכת העומקה.

4.4.3 מורה בשמן את הדסקה משני צידה. חצב את הפח בראש המשיכת העומקה 10, מרכז ודק בכוח חזק.

4.4.4 סובב את השסתומים הבורר 2 למבוק Cupping ושתותם הוויסות 3 למבוק Initial Position.

4.4.5 חדק את התבנית בכוח היד ושחרר $\frac{1}{2}$ סיבובים. אפס את מד התזוזה.

4.4.6 התנע את המנווע באמצעות מפסק 1.

4.4.7 קבע את לחץ החזוק באמצעות כפתור 5 לחץ הנדרש: 100 ק"ג לאלומיניום, 200-300

ק"ג לפלייז, 300-400 ק"ג לפלייז, 1000 ק"ג לפלאות. הלחץ מוגן בשעון .6

4.4.8 סובב את ידיית הוויסות 3 בכוונן השעון, המשיכת מוחילה. עקוב ורשום את הכוח והتوزזה ברוחחים קטנים.

4.4.9 הפסיק את פעולה המנווע 1 כשתקרב לכוכן מירבי $\frac{1}{2}$ כשביחסן בקריעת הדגם.

4.4.10 העבר את ידיית שסתום הוויסות 3 למבוק Return, הפעל את המפסק 1 עד שהמকב ייחזר

למצבו המקורי ונורת הקבורה תדלק. סגור את המפסק. ושחרר את הדגם.

5. הנחיות לדוח המסכם.

5.1 תאר את מחלך הניסוי.

5.2 שרטט את מחלך הכוח עם עליית המקבב בכל הדגמים. נסה להסביר את החבדלים.

5.3 מיין את החומרים שבדקה על פי המשיכות או כוואר המשיכת.

ספרות:

1. G. E. Dieter, *Mechanical metallurgy*, McGraw-Hill, ch. 6, 1986.
2. B. Avitzur, *Metal Forming*, McGraw Hill, 1968 (TS 205 A85).
3. Metals Handbook, *Forming*, 9th ed., ASM, 1978 (TA 459 A5 1978)
4. D. F. Eary and E. A. Reed, "Techniques of Pressworking Sheet Metal" (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1974) (TS 250 E15 1974)