

מעבדה במטלורגיות אבקות – סינטור וכבישה חמה

בטיחות: במעבדה זו אנחנו נעבוד עם אבקות ותנורים בטמפרטורה גבוהה. תמיד עקוב אחר הוראות המדריך והשתמש בשיקול הדעת הכי טוב שלך כאשר אתה בסביבת המעבדה.

מטרות

- א. הכרת תהליכי עיצוב של אבקות למוצק צפוף בשיטת כבישה חמה וסינטור בפאזה מוצקה.
- ב. לימוד השפעת פרמטרים שונים כגון לחץ כבישה, טמפרטורת הסינטור, אווירת הסינטור ושיטת הסינטור (סינטור חופשי או כבישה חמה) על תהליך הסינטור והתכונות של מוצרים מסונטרים.
- ג. אפיון התכונות של מוצרים מסונטרים.

רקע

מטלורגית האבקות תופסת חלק נכבד מתהליכי היצור של חלקים הנדסיים, בסמסטרים הקודמים ביצעתם מספר מעבדות תהליכים שבהם למדתם שיטות יצור למוצרים הנדסיים כגון: יציקה, עיבוד בקור, עיבוד שבבי וכו'. כמובן שלכל שיטה יש יתרונות וחסרונות ומטלורגית האבקות נועדה לענות על חלק מהחסרונות הקיימים בשיטות האחרות. אבן היסוד של טכנולוגיה זו היא **האבקה**, האבקה היא מוצק המחולק לחלקיקים שמימדיהם הגדולים ביותר קטנים ממילימטר אחד. אבקה מציגה תכונות הן של מוצק והן של נוזל: אבקה זורמת וממלאת חללים כמו נוזל, היא ניתנת לדחיסה ולעיצוב לצורה ריצוייה כמו מוצק. התכונה החשובה ביותר של האבקה הקשורה לנושא הסינטור היא שטח הפנים הגדול בין המוצק לאוויר. השטח הגדול כרוך באנרגית שטח גדולה והנטייה להקטין את האנרגיה של השטח היא **הכוח המניע** לתהליך הציפוף של האבקה לחומר מוצק המתרחש בטמפרטורות גבוהות ונקרא **סינטור**. במעבדה זה נלמד על מטלורגית האבקות שהיא מחקר התהליכים הקשורים בהפיכת אבקה לרכיב הנדסי. טכנולוגית האבקות מכילה ארבע שלבים עיקריים:

- א. **הפקת אבקות**: עוסקת בתהליך הפקת האבקה ואפיון תכונותיה: גודל וצורה של הגרגרים והרכבם הכימי. חלק זה לא ילמד במעבדה הנוכחית, על הסטודנט להתכונן באופן עצמאי מתוך **ASM**.
 - ב. **עיצוב**: מתן צורה לאבקה הקרובה לצורה של המוצר הסופי בדרכים שונות כגון: כבישה, ערגול, חישול, שיחול ועוד. במעבדה הנוכחית אנחנו נלמד שתי שיטות כבישה קרה וכבישה חמה.
 - ג. **סינטור**: תהליך ההדבקה של חלקיקי האבקה בטמפרטורה גבוהה. הוא עשוי להתרחש כשהחלקיקים נמצאים במצב מוצק אך במקרים רבים קיימת גם פאזה נוזלית בטמפרטורה גבוהה.
 - ד. **אפיון ומדידת תכונות**: אפיון תכונות המוצר: צפיפות, חוזק, מיקרומבנה וכו'.
- במעבדה זו יבדקו השפעת פרמטרים שונים כגון לחץ כבישה, טמפרטורת הסינטור, אווירת הסינטור ושיטת הסינטור (סינטור חופשי או כבישה חמה) על תכונות המוצר הסופי שהן שינוי ממדים, אחוז הציפוף וחמצון. אך לפני הכל ננסה להבין מהם הסיבות העיקריות לשימוש במטלורגית האבקות על פני שיטות אחרות?

- א. **כללית** - בשיטת מטלורגית האבקות ניתן לייצר יצור המוני ואוטומטי חלקים בעלי צורה מורכבת באופן הדיר ובמידות קרובות למידות הסופיות. שיטה זו נבדלת מעיצוב פלסטי ועיצוב ביציקה לדוגמא בחסכון בחומר הגלם (שיטות אלו כרוכות לרוב באובדן כמות גדולה של חומר ובצריכת אנרגיה גדולה). לדוגמא, בייצור כלים סניטאריים מחרסיות, משתמשים בבוץ לעיצוב המוצר ובסינטור בטמפרטורת ההיתוך של זכוכית שהיא נמוכה בהרבה מטמפרטורת ההיתוך של החומר.
- ב. **תכונות ומיקרומבנה ייחודיים** - לדוגמא, ניתן ליצור אבקות המצטיינות באחידות גבוהה של ההרכב בהשוואה ליציקה, לבצע עיצוב מתחת לטמפ' ההיתוך, להשיג הקשיה על ידי פיזור חלקיקים קראמיים במתכת, וליצור חומרים מרוכבים ממתכת וקרמיקה או חומרים נקבוביים.
- ג. **חומרים שלא ניתן לעצב בשיטות פשוטות אחרות**. חומרים פעילים מאוד או בעלי טמפרטורת היתוך גבוהה כמו טונגסטן, חומרים מטאסטאבילים (metastable) שישנו את המבנה שלהם בטמפ' גבוהות.

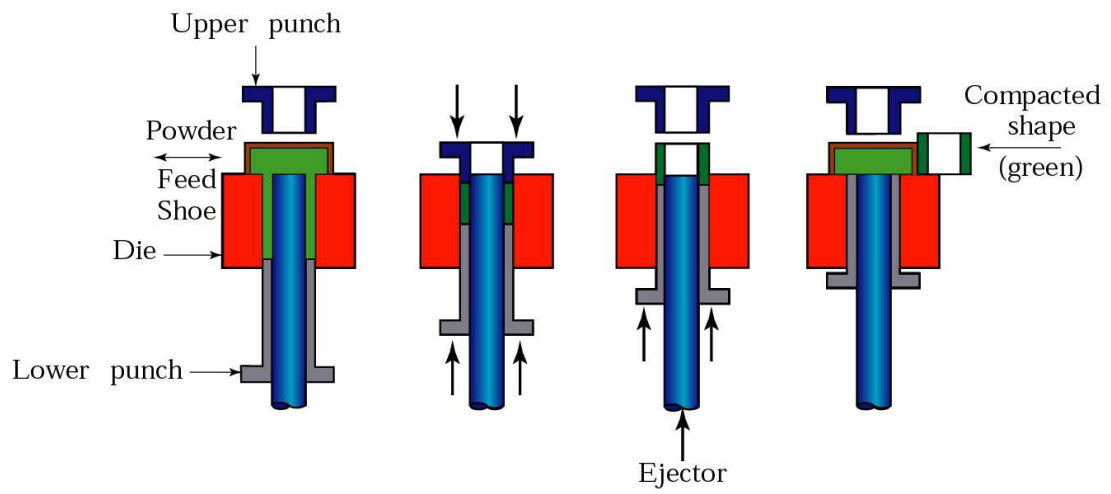
כאמור השלב הראשון במטלורגית האבקות היא הכנת חומר הגלם, אבקה המורכבת מסוג אחד או תערובת של אבקות. לאחר שיש לנו את חומר הגלם אנחנו צריכים לתת צורה. בעצם לעצב את החלק אותו אנחנו רוצים לייצר. שלב זה ניתן לעשות בדרכים שונות כגון: עיצוב בהזרקה, slip casting, חישול, שיחול, כבישה חד צירית, כבישה איזוסטטית קרה ועוד. במעבדה זו אנחנו נעצב את המוצר בעזרת כבישה קרה בלבד לגבי שאר השיטות יש לקרוא ב (ASM)

2. כבישה

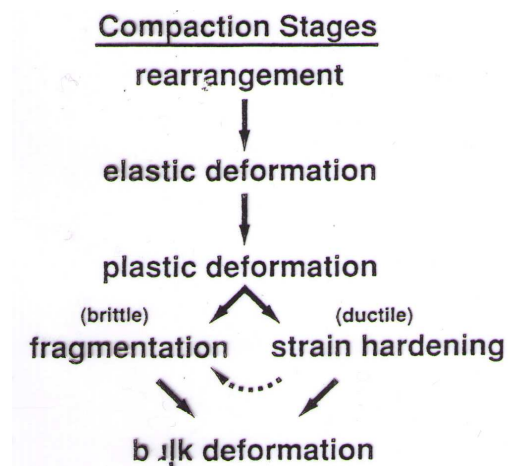
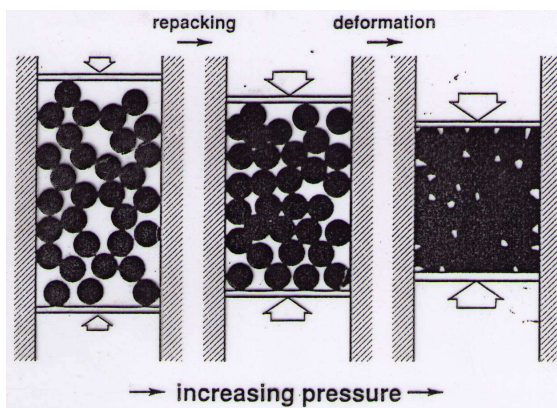
אחת הדרכים הפשוטות והנפוצות ביותר לעצב צורות גיאומטריות פשוטות מאבקה זה על ידי תהליך הכבישה הקרה. תוצר הכבישה הוא הצורה המבוקשת עם חוזק גבוהה במקרה של מתכות או יותר נמוך במקרה של חומרים קרמים (למה?) והחלק נקרא גוף ירוק (לפני הסינטור) תאור של תהליך הכבישה מובא באיור 1.

התהליך המתרחש במהלך הכבישה מובא באיור 2. בשלב ראשון, מסתדרים הגרגרים מחדש כשהם ממלאים חללים גדולים וכך מגדילים את מספר הקואורדינציה ואת שטחי המגע בניהם. כשהלחץ גדל נגרמת דפורמציה אלסטית ואחר כך דפורמציה פלסטית של אזורי המגע בין הגרגרים עד שנותרים בניהם רק נקבוביות קטנות. הצפיפות גדלה עם עלייה בלחץ הכבישה אך מתמתן בלחצים גבוהים (איור 16). בתחום זה החומר מגיב כמו מוצק מלא. בכל מקרה כשמשחררים את הלחץ חל שיחיר של הדפורמציה האלסטית המתבטא בכך שלא ניתן להחזיר לתבנית גוף שהוצא ממנה. לדוגמא, בלחיצה של אבקת ברזל:

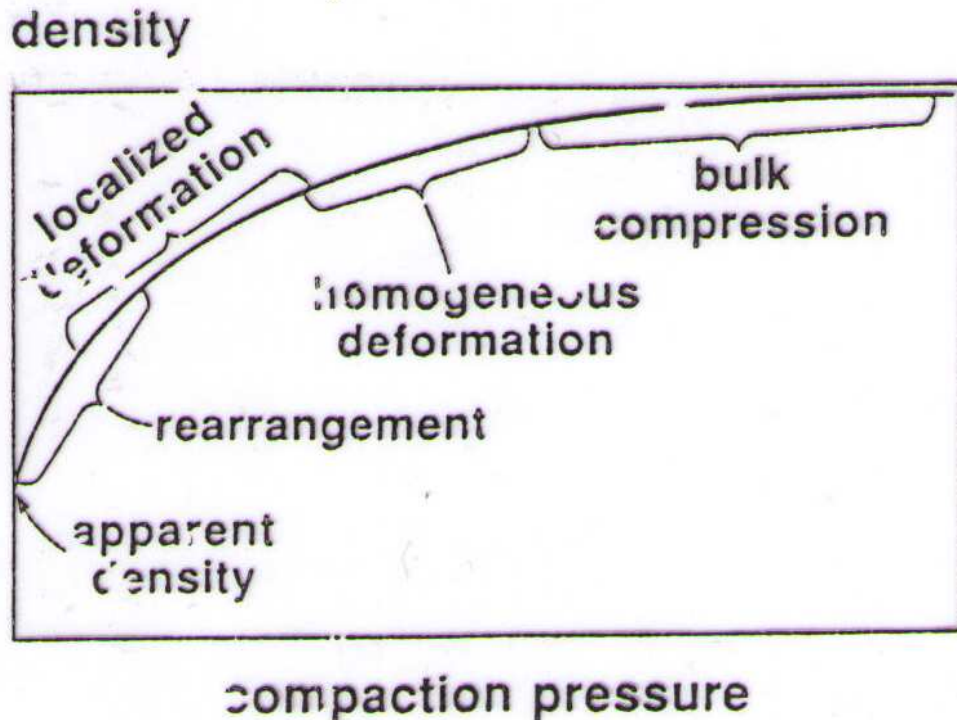
יחס דחיסה	צפיפות סופית gr/cm^3	לחץ MPa	צפיפות תחילית
2	4.8	335	2.4
2.9	7.0	770	2.4



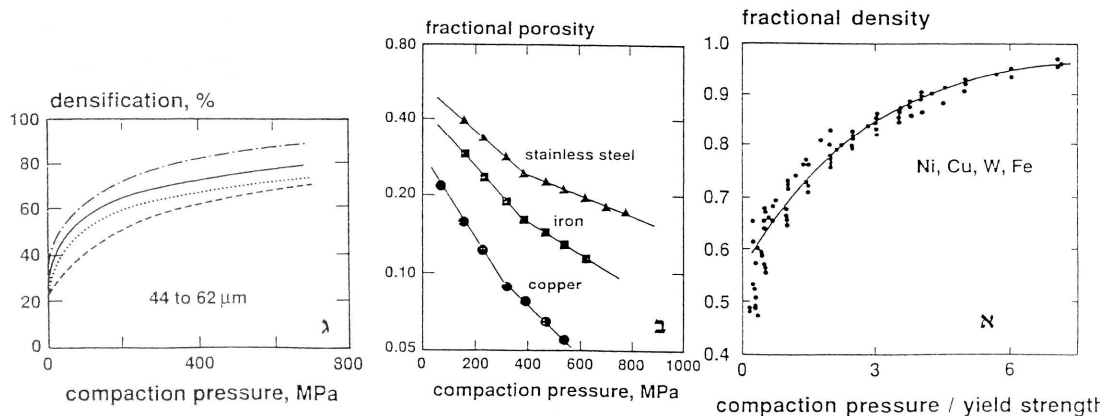
איור 1 – תהליך כבישה תנועת הטבעיים במחזור כבישת אבקה: מילוי התבנית, כבישה וחילוץ.



איור 2: כבישה אבקה.

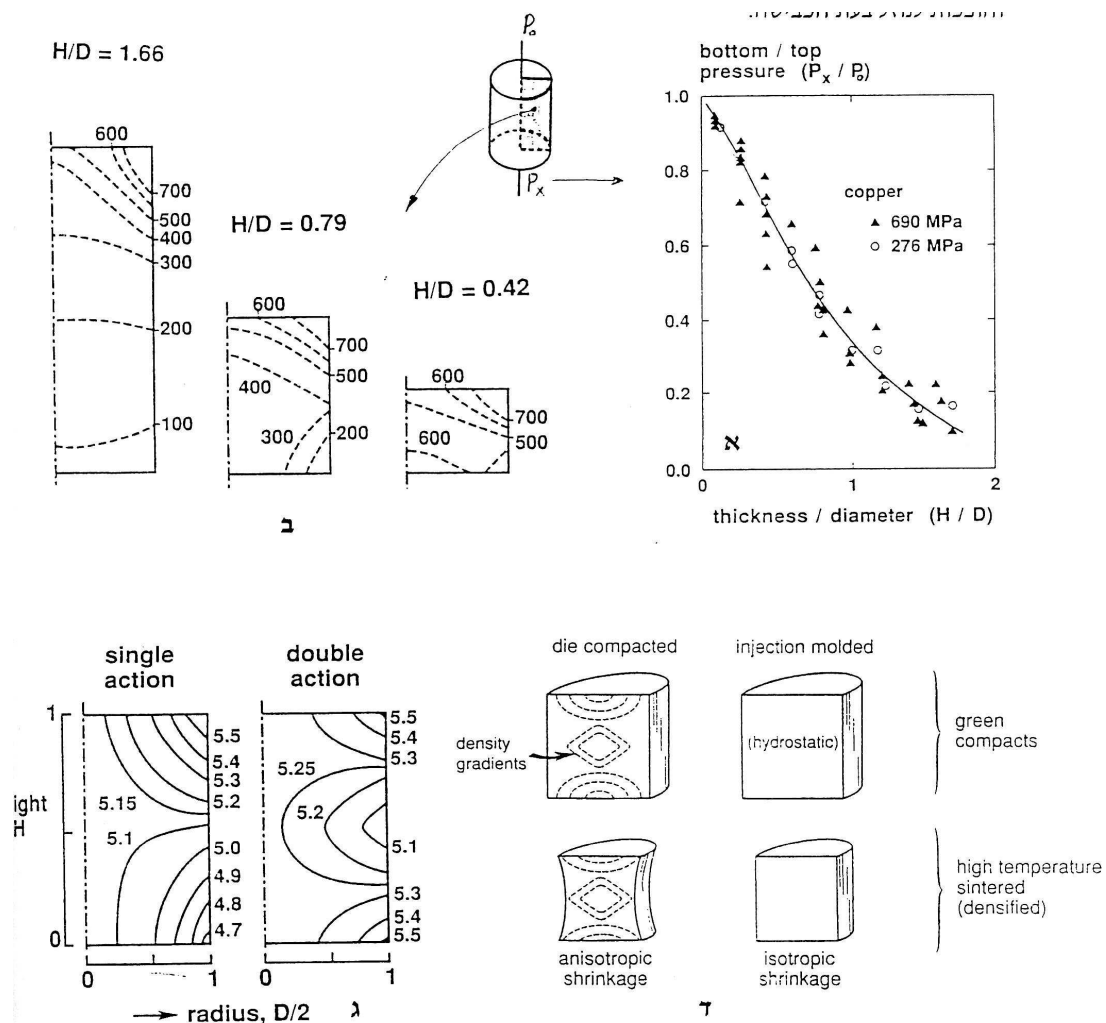


איור 4 מראה את תלות הצפיפות בלחץ. אנו מבחינים שנחושת, שהיא המתכת הרכה ביותר בין שלושת המתכות המשוות באיור 4, מגיעה לצפיפות הגבוהה ביותר. פלב"ם שהוא הקשה בין השלוש נותר עם נקבוביות (porosity) גבוהה. השינוי הפתאומי בשיפועי העקומות מעיד על שינוי במנגנון הציפוף, והוא מיוחס להקשיית עיבורים באבקה עקב דפורמציה פלסטית בלחצי כבישה גבוהים. כבישה בלחץ גבוה של חומרים פריכים (קרמיים) גורמת לשבירת הגרגרים, אולם גם בהם הציפוף יעיל יותר ככל שהקושי נמוך יותר. קשה לצופף אבקה עדינה מלצופף אבקה בעלת גרגרים גדולים, בין היתר מכיוון שחללים גדולים מתמוטטים בלחצים קטנים יותר.



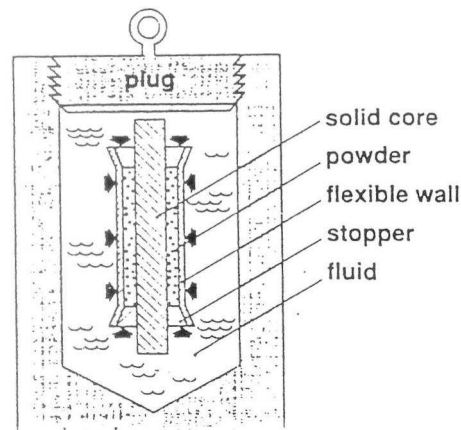
איור 4: התלות בין דרגת הציפוף ללחץ הכבישה א. בברזל, טונגסטן, נחושת וניקל (נתונים שונים משורטטים כפונקציה של לחץ מגורמל). ב. בנחושת, ברזל ופלב"ם (גודל גרגרים $1\text{ }\mu\text{m}$). ג. בארבעה חומרים קרמיים הרשומים בסדר עולה של קושי (גודל גרגרים $1\text{ }\mu\text{m}$). $\text{CaCO}_3=135$, $\text{MgO}=370$, $\text{SiO}_2=820$, $\text{Al}_2\text{O}_3=2100$, Knoop

הקושי העיקרי בתהליך הכבישה נובע מהחיכוך בין האבקה לדפנות התבנית. כוחות אלה גורמים לשחיקת התבנית ולירידה מהירה של הלחץ ככל שמתרחקים מהטבע, כמראה באיור 5א. מפל הלחץ בגוף האבקה גורם לכך שצפיפותה אינה אחידה (איור 5ב) ופירושו שבמהלך הסינטור שהגוף יתעוות (איור 5ד). מפל הצפיפות תלוי מאוד ביחס הגובה לקוטר של גוף האבקה. אחד האמצעים להקטין את מפל הלחץ הוא ערבוב חומרי סיכה עם האבקה. בדרך כלל משתמשים בחומצה הסטרית ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$, stearic acid) או בתרכובותיה שהן מוצקות בתנאים רגילים והופכות לנוזל בעת הכבישה.



איור 5: חיכוך בשלב הכבישה. א. היחס בין לחץ הכבישה ללחץ המועבר לתחתית של גליל של אבקת נחושת, כפונקציה של יחס הגובה לקוטר של הגליל. ב. מפת פילוג הלחץ בשלושה גלילים בגובה שונה של אבקת נחושת. לחץ הכבישה הוא 700MPa. המפה מתארת חצי מהחתך. ג. מפת פילוג הצפיפות בגלילי אבקת נחושת שנכבשו בשיטת פעולה אחת ובשיטת פעולה כפולה. ד. צורה של גלילים לפני ואחרי סינטור. הגלילים יוצרו בהזרקה ובלחיצה בפעולה כפולה.

דרך מקובלת אחרת היא לכבוש בפעולה כפולה של שני טבעים נעים double action compaction. איור 5 ג משווה את פילוג הצפיפות בכבישה עם טבע נע אחד לכבישה עם שני טבעיים נעים. ברור שלחיצה אחידה מכל הכוונים היא שיטה ריצויה לכבישה של צורות מורכבות וכשיחס הגובה לקוטר גבוה. שיטה כזו נקראת לחיצה איזוסטטית קרה (cold isostatic pressing) ואיור 6 מתאר אותה סכמאטית. ממלאים תבנית גמישה באבקה ומציבים אותה במיכל מים או שמן. על ידי העלאת הלחץ בנוזל מופעל על התבנית לחץ אחיד. מגבלות השיטה הן שקשה להשיג דיוק במימדים וקצב יצור החלקים קטן.



איור 6 תהליך כבישה איזוסטטית קרה מיושם ליצור צינור. האבקה נמצאת במיכל גמיש וסביב מוט המשמש לייבה. לחץ תלת כווני אחיד מופעל על ידי הנוזל במיכל.

החוזק המכאני של האבקה הדחוסה נקרא החוזק הירוק והוא גדל ליניארית עם לחץ הכבישה. קישור מכני בין הגרגרים הוא הגורם העיקרי לחוזק הירוק. תחת לחץ הכבישה נשברים הגרגרים או נגזרים ונוצרים שטחי מגע וחיבור מכני ביניהם. לכן לאבקה שגרגריה אינם אחידים בצורתם יש חוזק ירוק גדול. הכוחות החשמליים והכוחות בין האטומים (הכימיים) המקשרים בין הגרגרים הם קטנים כנראה. כוחות אלה גדלים ככל שהאבקה עדינה יותר ופני השטח נקיים יותר (בכבישה נשברות שכבות תחמוצת שמכסות את פני השטח של מתכות ומגדילות את הסיכוי להדבקה מכאנית בין הגרגרים). אך סכום כוחות האחיזה הוא קטן ונדרש שלב נוסף אשר "יחסל" את החללים (פורזיביות) שנשארו וייתן חוזק סופי לחומר. תהליך זה והשלב האחרון נקרא סינטור.

2.3 סינטור

סינטור הינו תהליך חיבור (הדבקה) של חלקיקי אבקה על ידי חימום של החומר לטמפרטורה גבוהה אך מתחת לטמפרטורת ההיתוך של החומר עד אשר כל החלקיקים דבוקים אחד אל השני. בד"כ תהליך הסינטור מתרחש כשהחלקיקים נמצאים במצב מוצק אך במקרים רבים קיימת גם פאזה נוזלית (סינטור בפאזה נוזלית). הכוח המניע לסינטור הוא הקטנת אנרגיית שטח הפנים שיש לאבקה, לכן הכוח המניע גדול ככל שגרגרי האבקה קטנים. לכן שטח הפנים קטן מהר במהלך הסינטור ותהליך זה ניתן לאבחנה כי החומר מתכווץ ונעשה צפוף יותר.

כאמור המנגנון של הסינטור הוא הסעת חומר לחללים שבין הגרגרים בדרך כלל בתהליכי דיפוזיה. קיימים 6 מנגנוני הסעת חומר אל הצוואר :

1. דיפוזיה על פני שטח הגרגרים.
2. דיפוזיה לאורך גבולות בין גרעינים.
3. דיפוזיה בנפח הגרעינים
4. הסעה על ידי דפורמציה פלסטית (החלקת נקעים).
5. הסעה על ידי זרימה צמיגה.
6. אידוי לפאזה הגזית ועיבוי.

ענה - איזה מנגנונים גורמים לציפוף ואיזה לא?

מבחינים בשלושה שלבים במהלך הסינטור:

שלב ראשון מאופיין בגידול מהיר של הצוואר בין הגרגרים.

א. שלב ביניים בו מבנה הנקבוביות נעשה חלק יותר והם הופכים לחללים גליליים. הכוח המניע לסינטור ניתן עתה על ידי רדיוס החללים הגליליים. הסעת החומר מתרחשת עתה בעיקר על ידי דיפוזיה בנפח הגרגרים, בפני השטח שלהם והגבולות בין הגרעינים. על תרומת הדיפוזיה על פני השטח מעידה ההעגלה של הנקבוביות. על תרומת הדיפוזיה לאורך גבולות הגרעינים מעידים ההיעלמות המהירה של נקבוביות המצויות על גבולות, יחסית לנקבוביות המצויות בתוך הגרעינים. תהליכים אלה נצפים בדגמים שנבדקים לאחר הפסקת השהייה בטמפרטורה הגבוהה לאחר זמנים קצרים מהזמן הדרוש לציפוף מלא. כך מוצאים גם נדידה של נקבוביות אחרי גבולות הגרעינים הגדלים.

ב. בשלב השלישי החללים נסגרים והופכים לנקבוביות סגורות. הכוח המניע לסיום הסינטור קשור לרדיוס הנקבוביות.

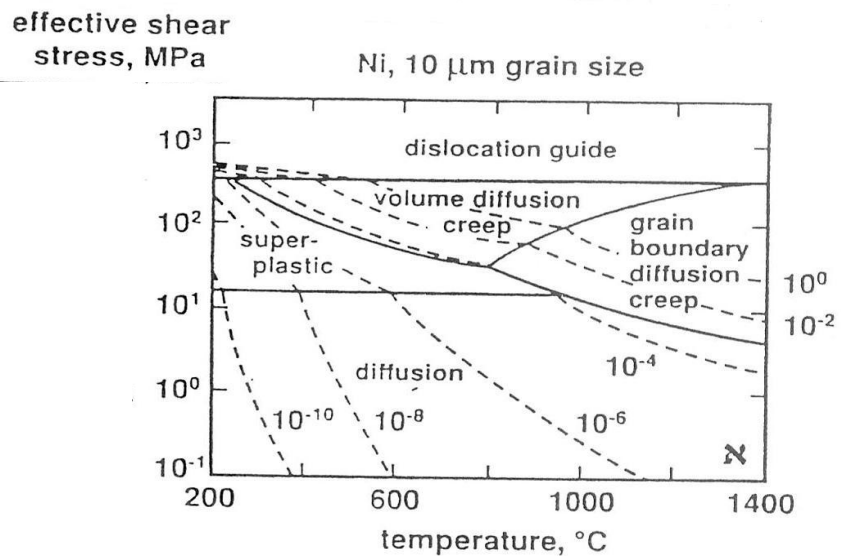
ג. כאמור תהליך הסינטור מתרחש בטמפרטורת גבוהות ומכאן סוג האווירה ששורת בתנור היא גורם מכריע לחומר המסנטור. לדוגמא בסינטור של מתכות וחומרים קראמיים מיוחדים (כמו ניטרידים) יש למנוע יצירת תחמוצות. בסינטור של תחמוצות לחץ החמצן בתנור משפיע על הסטוכיומטריה של המוצר. במעבדה הנוכחית נסנטר נחושת בתנור אוויר. הסבר כיצד נמנע את התחמצנותה (ראה מהלך מעבדה?) ואיך תהליך הגנה זה מתרחש?

2.4 האצת הסינטור במצב מוצק

בתהליך הרגיל של כבישה וסינטור אנחנו נשענים על האנרגיה התרמית שאנחנו מספקים והאנרגיה המתקבלת מחיסול פני השטח. על מנת להאיץ את תהליך הסינטור ניתן להשתמש בכמה שיטות כגון:

1 כבישה חמה – היא שיטה המשלבת את שלבי הכבישה והסינטור בפעולה אחת. כבישה חמה היא תהליך מורכב ויקר במידה ניכרת מהתהליך הרגיל של כבישה וסינטור נפרדים, אך הצפיפות הסופית גדולה בהשוואה לזו המתקבלת בתהליך רגיל או שהטמפרטורה הדרושה להשיג ציפוף דומה – קטנה במידה ניכרת.

כבישה חמה היא שילוב של תהליך סינטור עם תהליך זחילה. **זחילה** היא תהליך דפורמציה תחת מאמץ בטמפרטורה גבוהה. התגובה של חומרים לצירופים שונים של מאמץ וטמפרטורה מתוארת במפות דפורמציה (**איור 7**): במאמצים גבוהים ממאמץ הכניעה הציפוף מתפתח מיידית. במאמצים נמוכים יותר מנגנון הדפורמציה העיקרי הוא החלקת נקעים. במאמצים נמוכים עוד יותר מנגנון הדפורמציה העיקרי הוא דיפוזיה והציפוף מתפתח בתהליך דומה לזחילה דיפוזיונית. תהליך זה אחראי לשלב הסופי של סגירת הנקבוביות תהליך הציפוף מסוכם במפות ציפוף (**איור 7**). בהם מתוארים התחומים בהם שולט כל אחד מהמנגנונים שהוזכרו. שים לב שציר הלחץ הוא לוגריתמי ומעיד שהשפעת הלחץ קטנה מזו של הטמפרטורה.



איור 7: א. מפת דפורמציה של גרגרי ניקל בגודל 10μ המסכמת את מנגנוני הדפורמציה בתחומים שונים של טמפרטורות ומאמצים.

הסבר את תהליכי ומנגנוני הציפוף באיור 7 (Sintering theory and practice / Randall M. German)

יש שתי שיטות לכבישה חמה:

כבישה חד-צירית חמה – מערכת כבישה רגילה המתבצעת בתוך תנור. הטבעים עשויים גרפיט או מתכות עמידות בחום או מחומרים קראמיים (כשהלחצים נמוכים). בטמפרטורה הגבוהה המוצרים עלולים להזדהם בחומר הטבע והתבנית. התהליך הוא איטי בדרך כלל כי החימום והקרור נמשכים זמן רב יחסית. דוגמאות למוצרים המיוצרים בדרך זו הם חומרים מרוכבים מתכת ואבקת יהלום המשמש לכלי חיתוך, חומרים קרמיים כמו $Pb(Zr,Ti)O_3$ בעלי פעילות אופטית הנכבשים עד למצב שקוף לאור (מדוע?) ופיריטים שהם חומרים פרומגנטים.

כבישה איזוסטטית חמה (Hot Isostatic Pressing, HIP) – נעשית במערכת כבישה איזוסטטית. התבנית עשויה מחומר עמיד בחום (זכוכית, פל"ם או טנטלום) והיא נתונה לדפורמציה כמו האבקה. התבנית מרוקנת מגז ונאטמת לפני הכבישה. לחיצה והעברת חום מושגים באמצעות גז ארגון או חנקן.

קיימות שיטות נוספות להאצת תהליך הסינטור כפי שמובאות להל"ן ועל הסטודנט להרחיב באופן עצמאי את הידע בנושאים הבאים בהתבסס על 7. ASM-Vol.

1. **סינטור משופעל** (activated sintering) – כמויות קטנות של תוספים של חומרים שמתמוססים היטב

בחומר הבסיס נותרים בין הגרגרים ויוצרים על פניהם מסלולי דיפוזיה מהירים או אולי פאזה נוזלית.

2. **ייצוב פאזות** – בהן מקדם הדיפוזיה גבוה, למשל הדיפוזיה העצמית בברזל α גדולה פי 30 מזו בברזל γ

ב- 900°C , לכן מוטב לסנטר ברזל בתחום ה- α .

3. **הוספת חלקיקים** שמעכבים גידול גרעינים.

4. **סינטור באמצעות פזה נוזלית** – בסינטור של נתכים יש במקרים רבים פאזה בעלת טמפרטורת היתוך

נמוכה שתצור נוזל בעוד המרכיבים האחרים נותרים מוצקים. נוזל זה עשוי להאיץ באופן דרמטי את

הסינטור. במערכת מוצלחת הנוזל מרטיב היטב את המוצק, המוצק מתמוסס היטב בנוזל והדיפוזיה שלו

בנוזל מהירה. כשנוצר נוזל הוא זורם ומרטיב את הגרגרים המוצקים. תחילה מתרחש סידור מחדש

בהשפעת כוחות מתח הפנים, שמגדיל את הציפוף. אחר כך מתמוסס חלק מהמוצק עד שהנוזל נעשה רווי

במרכיבי המוצק, אז משמש הנוזל להסיע את מרכיבי המוצק בתהליך של המסה (של גרגרים קטנים)

ושיקוע מחדש של חומר (על הגרגרים הגדולים). כך גדל גודל הגרעינים במשך הסינטור.

2.5 תכונות של מוצרים מסונטרים

כל חומר או מוצר מאופיין על ידי תכונותיו הפיזיקאליות והכימיות. למוצרים מסונטרים יש תכונות מיוחדות

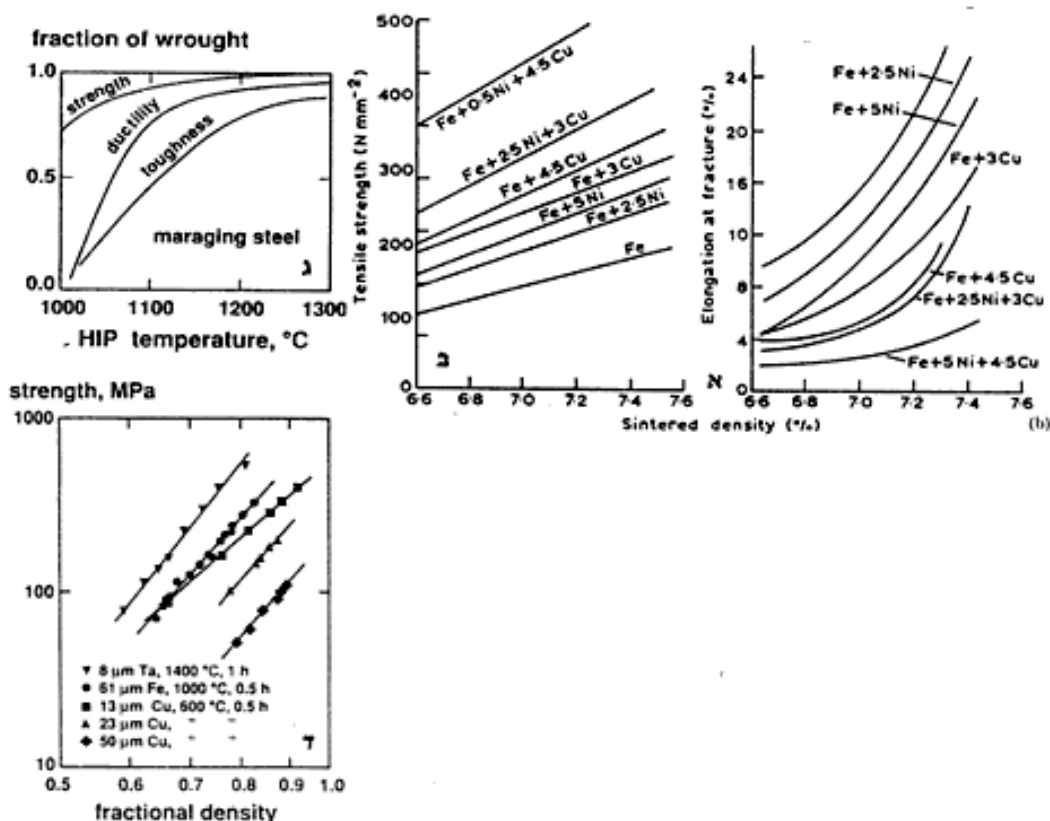
הקשורות לפילוג הנקבוביות שנותרו בו. לנקבוביות יש השפעה מזיקה מאוד על החוזק, המשיכות ותכונות

פיזיקאליות אחרות של מוצר מסונטר. בתחום של נקבוביות נמוכה הירידה בתכונות אלה מהירה במיוחד (**ציור**

30). הנקבוביות מגדילה את הפעילות הכימית של השטח לכן היא מקטינה את העמידות הסביבתית של מתכות

מסונטרות אולם משפרת את תפקודן ביישומים מיוחדים כמו זרזים (קטליזטורים), אלקטרודות בסוללות

חשמליות, מסננים או חלקי מסבים בהם ספיגת שמן במתכת היא תכונה ריצוייה !



ציור 30: התפתחות התכונות המכניות במהלך סינטור א-ב. חוזק ומשיכות של פלדות שונות כתלות בצפיפות של המוצר המסונטר ג. תכונות של פלדת maraging שעברה תהליך HIP ד. סיכום נתוני חוזק של מתכות אחדות.

מידע ישיר על מבנה הגרעינים והנקבוביות מתקבל מדגמים מלוטשים שנבדקים במיקרוסקופ אור או מיקרוסקופ אלקטרוני סורק, בו בודקים גם פני שבר של חמרים פריכים. את הנקבוביות הכללית נוהגים להפריד לנקבוביות פתוחה לפני השטח, לתוכה יכול נוזל לחדור, ולנקבוביות סגורה, שנוזל אינו יכול לחדור לתוכה מהשטח החיצוני. את שתיהן ניתן לקבוע על ידי שימוש בשיטת ארכימדס: פירוט השיטה נמצא בנספח א אותו יש ללמוד למעבדה.

שאלות הכנה למעבדה:

1. הסבר בקצרה מה היתרונות והחסרונות של מטלורגית האבקות?
2. עמוד על היתרונות של שיטה זו ליצור המוני של חלקים?
3. תאר לפחות 3 תהליכים להפקת אבקות קראמיות ו 3 לאבקות מתכתיות
4. תאר לפחות 3 שיטות למדידת גודל חלקיקים
5. השפעה כללית של גודל ו/או פילוג גודל החלקיקים על שלבי התהליך במטלורגית אבקות?
6. פרטי את השלבים בתהליכי הכבישה ומה מאפיין כל שלב?
7. מהו CIP? פרטי. עמוד/י על ההבדלים בין תהליך ה CIP לכבישה חד צירית.
8. הסבר בקצרה (עד 3 שורות לסעיף):
 - א. סינטור.
 - ב. הכח המניע לתהליך זה.
9. מהם הפרמטרים המשפיעים על הצפיפות הסופית וכיצד?
10. מהם מנגנוני מעבר החומר הגורמים לציפוף במהלך הסינטור? פרט
11. מהו סינטור משופעל?
12. מהו סינטור בפאזה נוזלית.
13. הסבר כיצד נמנע את התחמצנות הדגמים במעבדה (ראה מהלך מעבדה?)
14. הסבר איך תהליך הגנה זה מתרחש (במעבדה?)
15. מה השיקולים הכללים לבחירת אווירת הסינטור (ואקום, ארגון, חמצן, אוויר, מימן ועוד..)
16. הסבר ותאר את שיטת ארכימדס למדידת צפיפות ופורוזיביות של דגמים.
17. תאר 2 שיטות נוספות למדידת פורוזיביות (נקבוביות) של דגם לאחר תהליך סינטור?

מהלך המעבדה:

במעבדה זו נבצע סינטור של 8 דגמי נחושת אשר יכבשו בלחצים שונים ותיבדק השפעת אווירת הסינטור והטמפרטורה.

הכנת גוף ירוק



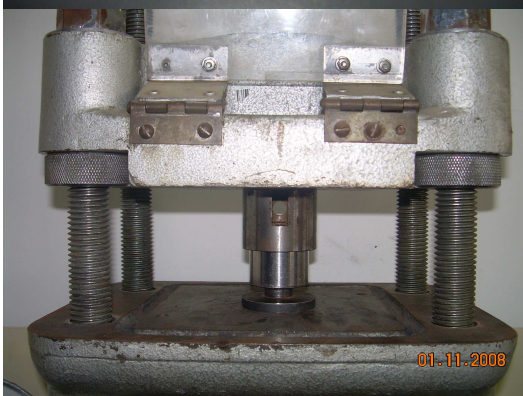
1 שקול 7 מנות אבקת נחושת בנות 1.5 גרם



2 גש למכשור וכבוש בעזרת טבע 8 מ"מ את שבע המנות בחלוקה הבאה. לאחר כל כבישה העבר חוטר בכל החלקים.



מספר דגמים	לחץ
3	25 bar
4	100 bar



- 3 מדוד את צפיפות הגוף הירוק – מדוד את הגובה והקוטר במד זחית ושקול כל דגם שוב



- 4 סמן כל דגם בעפרון

סינטור

- 1 הכנס כל 2 דגמים (שהוכנו בלחצים שונים) לכורית וכסה אותם בתערובת של גרפיט ואלומינה (50:50)

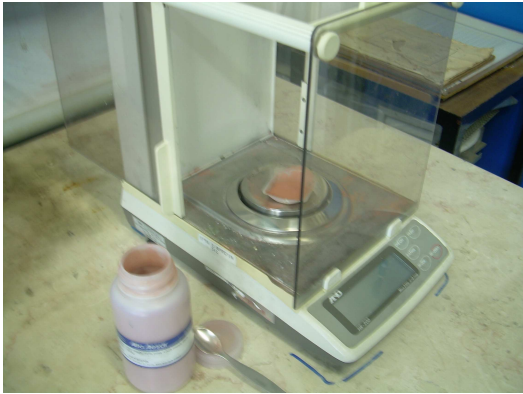


- 2 את הדגם שנשא (דגם מספר 5) השאר ללא כיסוי

- 3 הכנס כל כורית לתנור בטמפרטורה שונה 900°C , 800°C , 700°C , למשך 30 דקות, את הדגם ללא הכיסוי הכנס לתנור אשר חומם ל 800°C מעלות.



כבישה החמה



1

הכן מנה אחת של אבקת נחושת בת 6 גרם



2

צפה את פנים התבנית בתמיסת גרפיט אלכוהול.



3

העבר את המנה לתוך התבנית בדרך הבאה: הכנס את הטבע התחתון לכדי מחצית גובהו מלא את התבנית באבקה וסגור בעזרת הטבע העליון.



5

הצב במתקן הכבישה החמה .

כבוש ללחץ 25atm.

קבע את הצמד התרמי לתבנית, סגור את התנור וסגור את הפתחים בצמר זכוכית לבידוד.

פתח ברזי מים והפעל את התנור. כוון את הטמפרטורה ל- 800°C .

כאשר הטמפרטורה הגיעה ל 600 מעלות

העלה את הלחץ ל 100 אטמוספרות. כאשר

הטמפרטורה הגיעה ל- 800°C העלה את

הלחץ ל- 100 אטמוספרות והשהה למשך 5



דקות, תוך שמירה על לחץ קבוע.
בתום התהליך כבה את התנור ופתחו, הוצא
את הדגם על ידי החולץ (זהירות זה חם
המתן שיתקרר)
בשלב זה ניתן כבר להוציא את שאר
הדגמים מהתנורים והנח להם להתקרר

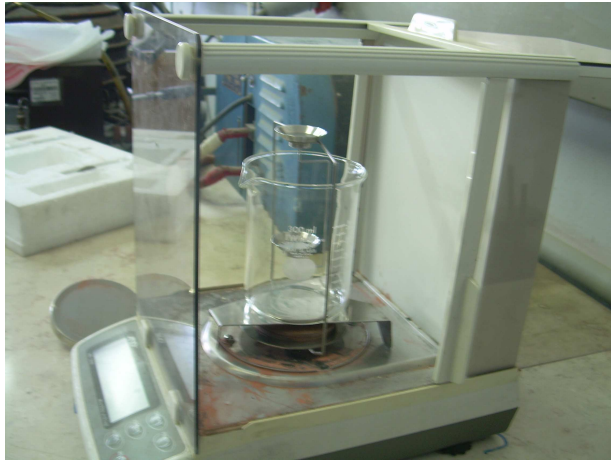
אפיון



1 לאחר שהדגמים התקררו מדוד את המשקל
של כל דגם והמימדים של כל הדגמים
ורשום בטבלה.



2 מדוד וחשב את הצפיפות והנקבוביות
הפתוחה והסגורה של הדגמים על פי שיטת
ארכימדס ורשום בטבלה.
יש להכניס כל דגם שנשקל לדסיקטור
ולשאוב את האוויר
לאחר למדוד את משקל הדגמים במצב
רטוב
ואת משקל הציפה.



טבלת תוצאות

[illegible]

מקורות:

1. Sintering theory and practice / Randall M. German - TS 245.G48 1996
2. Powder metallurgy science / Randall M. German - TN 695.G47 1994
3. חוברת תדריכים
4. Metals Handbook, Powder Metallurgy, ASM

נספח א – מדידת צפיפות ופורוזיביות פתוחה / סגורה

מדידת הפורוזיביות הפתוחה והסגורה במעבדה זו תערך בשיטת החדרת נוזל, בהתבסס על חוק ארכימדס (Archimedes). בשיטה זו מודדים את משקלם היבש של הדגמים, משקל ציפה ומשקל הדגם עם הנוזל שהוכנס. החדרת הנוזל לדגמים התבצעה על ידי הספגתם במים מזוקקים בתוך תא ואקום וזאת על מנת להוציא את האוויר הכלוא. הצפיפות משל החומר, ρ_{app} , הפורוזיביות הכללית, N , והפתוחה n חושבו

בעזרת הנוסחאות הבאות:

$$n = \frac{m_w - m_d}{m_w - m_s} \quad 1.$$

$$N = \frac{\rho_t - \rho_{app}}{\rho_t} \quad 2.$$

$$\rho_{app} = \frac{m_d}{m_w - m_s} \rho_t \quad 3.$$

m_d - משקל היבש, m_w - משקל הרטוב, m_s - משקל ציפה, ρ_t - צפיפות תיאורטית.

בהמשך מובא הסבר מפורט על הבעיות ונקודות נוספות במדידת הצפיפות תוך לקיחה בחשבון של השפעת צפיפות הנוזל

Methods for Determining Specific Gravity/Density

The Archimedean principle is applied for determining the specific gravity of a solid with this measuring device:

A solid immersed in a liquid is subjected to the force of buoyancy. The value of this force is the same as that of the weight of the liquid displaced by the volume of the solid.

With a hydrostatic balance which enables you to weigh a solid in air as well as in water, it is possible to:

determine the **specific gravity of a solid** if the density of the liquid causing buoyancy is known:

$$\rho = \frac{W(a) \cdot \rho(fl)}{W(a) - W(fl)}$$

or

determine the **density of a liquid** if the volume of the immersed solid is known:

$$\rho(fl) = \frac{G}{V}$$

where:

ρ = specific gravity of the solid
 $\rho(fl)$ = density of the liquid
 $W(a)$ = weight of the solid in air
 $W(fl)$ = weight of the solid in liquid
 G = buoyancy of the immersed solid
 V = volume of the solid

Sources of Error and Possibilities for Correction

The formula on the previous page for determining the specific gravity of solids is sufficient to obtain an accuracy of one to two decimal places.

Depending on the accuracy you require, consider the following error and allowance factors.

- The density of the liquid causing buoyancy depends on its temperature
- Air buoyancy during weighing in air
- The change in the immersion level of the pan hanger assembly when the sample is immersed
- Adhesion of the liquid on the suspension wire of the pan hanger assembly
- Air bubbles on the sample

Some of these errors can be corrected by calculation. To do so, it is necessary to proceed as follows:

- measure the temperature of the reference liquid and correct its density accordingly
- and
- define the inner diameter of the container which holds the reference liquid.

Dependence of the Liquid Density on Temperature

The density of the liquid causing buoyancy depends on the temperature. The change in the density per °C change in temperature is in the range of

- 0.02% for distilled water
- 0.1% for alcohols and hydrocarbons.

In other words, this can show up in the third decimal place during specific gravity/density determination.

To correct the liquid density for temperature, proceed as follows:

- measure the temperature of the liquid using the thermometer that comes with the kit
- use the table at the back of this manual to find the density of the most commonly used liquids, water and ethanol, at the temperature measured, and use this density for the value ρ (fl).

Air Buoyancy

A volume of 1 cm³ of air has a weight of approximately 1.2 mg, depending on its temperature, humidity and air pressure. When weighed in air, a solid is buoyed by a corresponding force per cm³ of its volume. The error that results if the air buoyancy is not allowed for shows up in the third decimal place and should therefore be corrected.

The following formula allows for air buoyancy:

$$\rho = \frac{W(a) \cdot [\rho(fl) - \rho(a)]}{W(a) - W(fl)} + \rho(a).$$

Where $\rho(a) = 0.0012 \text{ g/cm}^3$ = Density of air under standard conditions (temperature 20°C, pressure 101.325 kPa).

Depth of Immersion

The pan for holding and/or immersing the sample during weighing in liquid is rigidly attached to two wires and is immersed approximately 30 mm below the surface of the liquid. Since the balance is tared before each measurement, the additional buoyancy caused by the immersed part of the measuring device is not allowed for in the specific gravity determination.

When a solid sample is weighed in liquid, a volume of the liquid will be displaced which corresponds to the volume of the solid sample. This causes the attachment wires of the pan hanger assembly to be immersed deeper and generate additional buoyancy which introduces an error in the specific gravity determination.

Use the following formula to correct this error:

$$\rho = \frac{W(a) \cdot [\rho(fl) - \rho(a)]}{0.99983 [W(a) - W(fl)]} + \rho(a)$$

Since the correction factor is determined exclusively by the geometry of the measuring device setup, be sure to only use the large diameter beaker (76 mm) from the kit when determining the specific gravity of a solid. The "Supplement" to this manual shows how this correction factor is derived.

Adhesion of Liquid to the Wire

When the sample holder (or sieve) is immersed in liquid causing buoyancy, liquid travels up the wire because of adhesion forces and generates an additional weight in the range of a few milligrams.

Since the sample holder (or sieve) is in the liquid causing buoyancy during both weighing in air and weighing in liquid, and the balance is tared at the beginning of each measuring procedure, the effect of the meniscus can be disregarded.

To reduce the surface tension and the friction of liquid on the wire, add three drops of a tenside (Mirasol Antistatic) or an ordinary dishwashing detergent to the distilled water in the beaker.

Because of the liquid travelling up the wire, the weight may slowly change even after the stability symbol "g" appears. Therefore, read off the weight immediately after the "g" is displayed.

Air Bubbles

The measuring error caused by air bubbles adhering to the sample can be estimated in the following manner. An air bubble with a diameter of 0.5 mm causes an additional buoyancy of less than 0.1 mg when a sample is weighed in water. An air bubble diameter of 1 mm causes additional buoyancy of 0.5 mg and an air bubble diameter of 2 mm causes approx. 4.2 mg additional buoyancy. Larger air bubbles must be removed with a fine brush or other utensil.

You can also wet the sample in a separate container before you weigh it.

Determining the Specific Gravity/Density

Determining the Specific Gravity of Solids

- Preparation**
(Distilled water is used in the description)
- Center the large-diameter beaker (76 mm Ø) on the metal platform
 - Fill it so that the distilled water is approximately 5 mm below the rim
 - Add three drops of tenside to the distilled water
 - Attach the thermometer to the rim of the beaker using the retainer clip
 - Clean the sample holder with a solvent (especially the wires that will be immersed) and hang it from the frame

Measuring Procedure

Determining the Weight of a Sample in Air

- Tare the balance
- Place the sample on the upper pan on the frame and weigh
- Record the weight $W(a)$

Determining the Buoyancy

- $G = W(a) - W(fl)$
- Tare the balance with the sample on the upper pan on the frame
 - Place the sample in the sample holder¹⁾
 - Record the absolute readout of the buoyancy "G," which is displayed with a negative sign

Calculating the Specific Gravity

- Read off the temperature of the liquid
- Using the tables at the back of this manual, find the density $\rho(fl)$ which corresponds to the temperature measured for the liquid you are using
- Calculate specific gravity using the following formula:

$$\rho = \frac{W(a) \cdot [\rho(fl) - 0.0012 \text{ g/cm}^3] + 0.99983 \text{ G}}{0.99983 \text{ G}}$$

$W(a)$ and G in g; $\rho(fl)$ in g/cm³

$$G = W(a) - W(fl)$$

¹⁾ If you remove the pan hanger assembly from the measuring device to do this, make sure that no additional air bubbles are on it when you re-immers it; it is better to place the sample directly on the pan using forceps or a similar utensil.

Determining the Specific Gravity of Solids with a Density Less Than 1 g/cm³

There are two different methods for determining the specific gravity of solids with a density less than 1 g/cm.

Method 1:

For this method, distilled water is still used as the liquid causing buoyancy, but the pan hanger assembly is replaced by the sieve for immersing samples.

To determine the sample's buoyancy, float it on the surface of the water and then immerse it using the sieve. It is also possible to use forceps or a similar tool to place the sample directly under the sieve (without removing the sieve from the frame).

If the buoyancy of the substance to be measured is so high that the weight of the sieve is not enough to immerse the sample, increase the weight of the sieve by adding an additional weight to the upper pan on the frame.

Method 2:

For this method, use the sample holder) Here, use a liquid for causing buoyancy with lower density than that of the solid for which the specific gravity is to be determined. We have had good results with ethanol (up to a density of approx. 0.8 g/cm³).

The density $\rho(fl)$ of ethanol (with reference to its temperature) can be found in the table in the supplement.

The negative effect of the liquid's surface tension on the results is less noticeable when ethanol is used than when distilled water is employed. Therefore, it is not necessary to add tensides.

When working with ethanol, you must observe the valid safety precautions.

Use Method 2 if the density of the solid varies only slightly from that of distilled water. Since the sample is suspended in water, measuring errors may occur if the first method is used.

It also makes sense to use the second method when determining the specific gravity of a granulated substance, since it would be difficult to get the entire sample under the sieve as required when performing the first method. Do not use ethanol if the sample could be attacked or dissolved by it.

Preparation (for Method 1 only)

- (Distilled water is used in the description.)
- Center the large-diameter beaker (76 mm Ø) on the metal platform
 - Fill it so that the distilled water is approximately 5 mm below the rim
 - Add three drops of tenside to the distilled water
 - Attach the thermometer to the rim of the beaker using the retainer clip
 - Clean the sieve with a solvent (especially the wires that will be immersed) and hang it from the frame

Measuring Procedure (for Method 1 only)

Determining the Weight of the Sample in Air

- Tare the balance
- Place the sample on the frame weighing pan and weigh
- Record the weight $W(a)$

Determining the Buoyancy

$$G = W(a) - W(fl)$$

- Tare the balance again (with the sample on the frame weighing pan)
- Place the sample under the sieve or immerse it below the surface of the liquid using the sieve¹⁾
- Record the buoyancy "G," which is displayed with a negative sign

Calculating the Specific Gravity

- Read off the temperature of the liquid
- Using the table at the back of this manual, find the density $\rho(fl)$ which corresponds to the temperature measured for distilled water
- Calculate the specific gravity using the following formula:

$$\rho = \frac{W(a) \cdot \rho(fl)}{0.99983 G} + 0.0012 \text{ g/cm}^3$$

$$W(a) \text{ and } G \text{ in g; } \rho(fl) \text{ in g/cm}^3$$
$$G = W(a) - W(fl)$$

Determining the Density of Liquids

Preparation

- Center the small-diameter beaker (55 mm Ø) on the metal platform
- Attach the thermometer to the rim of the beaker using the retainer clip

Measuring Procedure

- Suspend the disk with the glass plummet (hanging on one wire) from the frame
- Tare the balance
- Fill the beaker with the liquid to be tested so that the liquid is 10 mm above the glass plummet

Determining the Buoyancy

$$G = W(a) - W(fl)$$

The negative weight displayed by the balance corresponds to the buoyancy acting on the glass plummet in the liquid.

- Record the buoyancy displayed with a negative sign
- Read off the temperature and record it

Calculating the Density

- Calculate the density using the following formula:

$$\rho(fl) = \frac{G}{V}$$

$$G \text{ in g; } V \text{ in cm}^3$$

The glass plummet included in the specific gravity/density determination kit has a volume of 10 cm³.

It is easy to obtain the current density of the liquid (in g/cm³); you will not need a calculator. Mentally shift the decimal point in the balance display one place to the left.

¹⁾ If you remove the pan hanger assembly from the measuring device to do this, make sure that no additional air bubbles are on it when you re-immerses it in the liquid; it is better to place the sample directly under the pan using forceps or a similar utensil.

Application in Legal Metrology

The density determination kit, YDK 01-0D, may only be used in legal metrology to determine the density of liquids.

In addition to the bar frame, adapter and metal plate, the following components provided with the YDK 01-0D will be needed:

- Beaker 55 mm Ø
- Glass plummet Material: AR glass
Volume: 10 cm³
suspended on a constantan wire
- Verified thermometer: Designed in accordance with E014.1
Scale from 15–25°C
Readability: 0.1°C
Accuracy: ±0.1°C

Tables

Density of H₂O at Temperature T (in °C)

T/°C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10.	0.99773	0.99772	0.99771	0.99770	0.99669	0.99668	0.99667	0.99666	0.99665	0.99664
11.	0.99663	0.99662	0.99661	0.99660	0.99659	0.99658	0.99657	0.99656	0.99655	0.99654
12.	0.99653	0.99651	0.99650	0.99649	0.99648	0.99647	0.99646	0.99644	0.99643	0.99642
13.	0.99641	0.99639	0.99638	0.99637	0.99635	0.99634	0.99633	0.99630	0.99629	0.99628
14.	0.99627	0.99626	0.99624	0.99623	0.99622	0.99620	0.99619	0.99617	0.99616	0.99614
15.	0.99613	0.99611	0.99610	0.99608	0.99607	0.99605	0.99604	0.99602	0.99600	0.99599
16.	0.99607	0.99606	0.99604	0.99602	0.99601	0.99600	0.99599	0.99598	0.99598	0.99598
17.	0.99600	0.99600	0.99600	0.99600	0.99600	0.99600	0.99600	0.99600	0.99600	0.99600
18.	0.99602	0.99600	0.99599	0.99597	0.99595	0.99593	0.99591	0.99589	0.99587	0.99585
19.	0.99603	0.99601	0.99600	0.99598	0.99595	0.99593	0.99591	0.99589	0.99587	0.99585
20.	0.99603	0.99601	0.99600	0.99598	0.99595	0.99593	0.99591	0.99589	0.99587	0.99585
21.	0.99602	0.99600	0.99598	0.99595	0.99593	0.99591	0.99589	0.99586	0.99584	0.99582
22.	0.99600	0.99597	0.99595	0.99592	0.99589	0.99586	0.99583	0.99580	0.99577	0.99574
23.	0.99596	0.99594	0.99591	0.99588	0.99585	0.99582	0.99579	0.99576	0.99573	0.99570
24.	0.99592	0.99590	0.99587	0.99584	0.99581	0.99578	0.99575	0.99572	0.99569	0.99566
25.	0.99587	0.99585	0.99582	0.99579	0.99576	0.99573	0.99570	0.99567	0.99564	0.99561
26.	0.99581	0.99578	0.99575	0.99572	0.99569	0.99566	0.99563	0.99560	0.99557	0.99554
27.	0.99574	0.99571	0.99568	0.99565	0.99562	0.99559	0.99556	0.99553	0.99550	0.99547
28.	0.99566	0.99563	0.99560	0.99557	0.99554	0.99551	0.99548	0.99545	0.99542	0.99539
29.	0.99557	0.99554	0.99551	0.99548	0.99545	0.99542	0.99539	0.99536	0.99533	0.99530
30.	0.99547	0.99544	0.99541	0.99538	0.99535	0.99532	0.99529	0.99526	0.99523	0.99520

Supplement

Density of Ethanol at Temperature T (in °C)

T/°C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10.	0.79784	0.79775	0.79767	0.79758	0.79750	0.79741	0.79733	0.79725	0.79716	0.79708
11.	0.79699	0.79691	0.79682	0.79674	0.79665	0.79657	0.79648	0.79640	0.79631	0.79623
12.	0.79614	0.79606	0.79598	0.79589	0.79581	0.79572	0.79564	0.79555	0.79547	0.79538
13.	0.79530	0.79521	0.79513	0.79504	0.79496	0.79487	0.79479	0.79470	0.79462	0.79453
14.	0.79445	0.79436	0.79428	0.79419	0.79411	0.79402	0.79394	0.79385	0.79377	0.79368
15.	0.79360	0.79352	0.79343	0.79335	0.79326	0.79318	0.79309	0.79301	0.79292	0.79284
16.	0.79275	0.79267	0.79258	0.79250	0.79241	0.79232	0.79224	0.79215	0.79207	0.79198
17.	0.79190	0.79181	0.79173	0.79164	0.79156	0.79147	0.79139	0.79130	0.79122	0.79113
18.	0.79105	0.79096	0.79088	0.79079	0.79071	0.79062	0.79054	0.79045	0.79037	0.79028
19.	0.79020	0.79011	0.79002	0.78994	0.78985	0.78977	0.78968	0.78960	0.78951	0.78943
20.	0.78934	0.78926	0.78917	0.78909	0.78900	0.78892	0.78883	0.78874	0.78866	0.78857
21.	0.78849	0.78840	0.78832	0.78823	0.78815	0.78806	0.78797	0.78789	0.78780	0.78772
22.	0.78763	0.78755	0.78746	0.78738	0.78729	0.78720	0.78712	0.78703	0.78695	0.78686
23.	0.78678	0.78669	0.78660	0.78652	0.78643	0.78635	0.78626	0.78618	0.78609	0.78600
24.	0.78592	0.78583	0.78575	0.78566	0.78558	0.78549	0.78540	0.78532	0.78523	0.78515
25.	0.78506	0.78497	0.78489	0.78480	0.78472	0.78463	0.78454	0.78446	0.78437	0.78429
26.	0.78420	0.78411	0.78403	0.78394	0.78386	0.78377	0.78368	0.78360	0.78351	0.78343
27.	0.78334	0.78325	0.78317	0.78308	0.78299	0.78291	0.78282	0.78274	0.78265	0.78256
28.	0.78248	0.78239	0.78230	0.78222	0.78213	0.78205	0.78196	0.78187	0.78179	0.78170
29.	0.78161	0.78153	0.78144	0.78136	0.78127	0.78118	0.78110	0.78101	0.78092	0.78084
30.	0.78075	0.78066	0.78058	0.78049	0.78040	0.78032	0.78023	0.78014	0.78006	0.77997

Calculation
The **specific gravity of a solid** is calculated from the ratio
 $\rho : W(a) = \rho(f) : W(a) - W(f)$,
where:

$$\rho = \frac{W(a) \cdot \rho(f)}{W(a) - W(f)}$$

$$W(a) - W(f) = G = \text{buoyancy of the sample}$$

The **density of a liquid** is determined from the buoyancy of the plummet, which has a defined volume

$$V(f) = \frac{G}{\rho(f)}$$

where:

ρ = specific gravity of a solid
 $\rho(f)$ = density of the liquid
 $W(a)$ = weight of the solid in air
 $W(f)$ = weight of the solid in liquid
 G = buoyancy of the plummet
 V = volume of the solid

This supplement should help you to better understand how the formulas and allowance factors used here have been derived.

Fundamental Principles

$$\text{Density} = \frac{\text{Mass (g)}}{\text{Volume (cm}^3\text{)}}$$

The Archimedeian Principle:

A solid immersed in a liquid is exposed to the force of buoyancy (G). This value is the same as that of the weight of the liquid displaced by the volume of the solid. The volume of an immersed solid V (s) equals the volume of the displaced liquid V (fl).

The following are determined:

1. The weight of the sample in air: $W(a)$
2. The buoyancy of the solid in liquid: G

The specific gravity of a solid is:

$$\rho = \frac{\text{sample mass}}{\text{sample volume}} = \frac{W(a)}{V(s)} = \frac{W(a)}{V(f)}$$

If the density $\rho(f)$ of the displaced liquid is known, then

$$V(f) = \frac{\text{Mass (fl)}}{\rho(f)} = \frac{G}{\rho(f)}$$

Therefore:

$$\rho = \frac{W(a) \cdot \rho(f)}{G}$$

Allowance Factors

You must allow for the following when determining the specific gravity of solids:

- the air buoyancy that affects the sample weighed in air

where $\rho(a) = 0.0012 \text{ g/cm}^3$ = density of air under standard conditions (temperature 20°C, pressure 101.325 kPa); which results in the following:

$$\rho = \frac{W(a) \cdot [\rho(f) - \rho(a)]}{W(a) - W(f)} + \rho(a)$$

- the immersion of the wires of the sample holder or sieve

When using this specific gravity determination kit, you must multiply the buoyancy $G = [W(a) - W(f)]$ by the factor 0.99983 (Corr). Therefore:

$$\rho = \frac{W(a) \cdot [\rho(f) - \rho(a)]}{[W(a) - W(f)] \cdot \text{Corr}} + \rho(a)$$

This factor allows for the buoyancy of the wires which are submerged deeper when the sample is in the sample holder.

How this allowance factor is derived:

The buoyancy caused by the submerged wires depends on the height "h" by which the liquid rises when the sample is immersed.

Here, the sample volume V (pr) corresponds to the liquid volume V (fl). The sample volume is determined by measuring the buoyancy. Hence, it is:

$$V(\text{pr}) = V(\text{fl})$$

or

$$\frac{W(a) - W(f)}{\rho(f)} = \frac{\pi \cdot h \cdot D^2}{4}$$

$$\text{Therefore, } h = \frac{4 \cdot [W(a) - W(f)]}{\rho(f) \cdot \pi \cdot D^2}$$

The buoyancy "A" caused by the immersed wires is:

$$A = 2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \cdot \rho(f)$$

When "h" is used:

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot 4 \cdot [W(a) - W(f)] \cdot \rho(f)}{4 \cdot \rho(f) \cdot \pi \cdot D^2}$$

$$A = 2 \cdot \frac{d^2}{D^2} \cdot [W(a) - W(f)]$$

To allow for the buoyancy of the wires, subtract the buoyancy "A" caused by the immersed wires from the buoyancy determined for the sample: $G = W(a) - W(f)$. The corrected buoyancy "A (corr)" to use in this calculation is then: $G - "A"$

$$A(\text{corr}) = [W(a) - W(f)] - 2 \cdot \frac{d^2}{D^2} \cdot [W(a) - W(f)]$$

$$A(\text{corr}) = \left[1 - 2 \cdot \frac{d^2}{D^2} \right] \cdot [W(a) - W(f)]$$

The specific gravity determination kit uses the large-volume beaker (76 mm Ø) and an immersing device with 2 wires (0.7 mm diameter) for the determination of the specific gravity of solids. When the values $d = 0.7 \text{ mm}$ and $D = 76 \text{ mm}$ are plugged into the equation, the correction factor is:

$$1 - 2 \cdot \frac{0.7^2}{76^2} = 0.99983$$

When using devices with other dimensions, the correction factor must be recalculated.