

התנהגות מכנית של חומרים 0581.3181

0581.3181 Mechanical Behavior of Materials

מרצה הקורס: פרופ' אילן גולדפרב

Lecturer: Prof. Ilan Goldfarb

נושאי הקורס

הקורס עוסק בקשר בין תכונות מכניות של חומרים והתנהגותם המכנית למיקרומבנה שלהם: מנגנוני חיזוק, זחילה, התעייפות, ויסקואלסטיות, ויסודות תורת הנקעים. הדגש בקורס הוא על פרק הנקעים, שהוא הנרחב ביותר בקורס.

This course emphasizes the relation between mechanical properties and materials microstructure: strengthening mechanisms, creep, fatigue, viscoelasticity, and in particular elements of dislocation theory.

1. סקירת מנגנוני חיזוק שונים, כגון הקשיית המסה, הקשיית מתבדלים, הקשיית עיבורים, וכו'.

1. Survey of strengthening mechanisms, such as solution strengthening, precipitation hardening, strain hardening, etc.

2. **זחילה**: הגדרת הבעיה ומערכות אופייניות הנמצאות בסכנת זחילה, כגון מנועי סילון, טורבינות, מיכלי לחץ, וכו'. מנגנוני זחילה – זרימה צמיגה ודיפוזיונית, וזרימה פלסטית באמצעות נקעים. זחילה דיפוזיונית במנגנון הרינג-נאבארו. תיאור מתמטי של זחילה ראשונית, שניונית, ושלישונית. השפעת טמפרטורה ומאמץ. השפעת המיקרומבנה וגורמים מטלורגיים. שיטות למניעת זחילה ומיקרומבנה של נתכי-על המיועדים לעבודה בטמפרטורות גבוהות. ניסויי זחילה ושיטות אקסטרפולציה (שרבי-דורן, לרסון-מילר, מונקמן-גרנט). שחרור מאמצים בתנאי זחילה.

2. Creep: definition and examples, such as jet engines, turbines, pressure vessels, etc. Creep mechanisms, diffusion creep and viscous flow, plastic creep deformation by dislocations, Herring-Nabarro creep. Mathematical description of primary, secondary, and tertiary creep. The effect of temperature and stress, and the microstructural and metallurgical effects. Creep prevention and microstructure of high-temperature superalloys. Creep experiments and extrapolation methods (Sherby-Dorn, Larson-Miller, Monkman-Grant), stress relaxation under creep conditions.

3. **התעייפות**: עמיסה דינמית ומערכות טיפוסיות הנתונות לסכנת התעייפות. דוגמאות היסטוריות לכשל התעייפות. מנגנוני התעייפות, נוקלאציית והתקדמות סדקי התעייפות, ותוואי פני שבר אופייניים לכשל התעייפות. תיאור מתמטי של עמיסה מחזורית והגדרת פרמטרי התעייפות חשובים (מאמצים מינימליים ומכסימליים, מאמץ ממוצע, משרעת המאמץ, יחס המאמצים, וכו'). ניסויי התעייפות ודרכי הצגת הבעיה: עקומת S-N וגבול התעייפות, דיאגרמת הייג-סודרברג, דיאגרמות גרבר וסודרברג, וצורות שונות של הצגת דיאגרמת גודמן לפתרון בעיות התעייפות בדרך גראפית. פתרונות אנליטיים וגרפיים לבעיות התעייפות. השפעת גורמים שונים על אורך חיים בהתעייפות. שימוש ביסודות מכניקת השבר לחיזוי קצב התקדמות של סדקי התעייפות: קריטריון גריפיט, קצב שחרור האנרגיה, מקדם עוצמת המאמץ וחסיונות השבר. חוק פאריס להתקדמות סדק התעייפות ומציאת מספר מחזוריים עד לשבר. השפעת גורמים מטלורגיים וסביבתיים על אורך חיים בהתעייפות.

3. Fatigue: Dynamic loading and typical systems prone to fatigue failure. Historical examples of fatigue failures. Fatigue mechanisms, nucleation and propagation of fatigue cracks, mathematical description of cyclic loading and definition of parameters (max, min, and mean stresses, stress amplitude and ratio). Fatigue experiments and the ways of data presentation: the S-N curve and fatigue limit, Haig-Soderberg diagram, Gerber and Soderberg diagrams, various ways of presenting the Goodman diagram, and analytical and graphical solutions of fatigue problems. Effect of various factors on fatigue life. Use of fracture

mechanics for prediction fatigue crack propagation rate: Griffith criterion, energy release rate, stress intensity factor and fracture toughness. Paris law and calculation of fatigue life cycles. The effects of metallurgical and environmental factors on fatigue life.

4. ויסקואלסטיות: מודלים ראולוגיים (גוף מקסוול, גוף וויט-קלווין, גוף טורי-מקבילי מעורב), בליעה ושיכוך בגופים ויסקואלסטיים, דעיכה טבעית ושיכוך לוגריתמי, גורם איכות. מודולוס רלקסציה בפולימרים, אפקט תרמו-אלסטי, אפקט שנק בגבישי bcc, ומנגנוני בליעה אחרים. שיקולים ראולוגיים, מספר דבורה, וזמני רלקסציה. זיכרון ויסקו-אלסטי, אלסטומרים, והשפעת מבנה הפולימר על תכונות מכניות.

4. Viscoelasticity: rheological models (Maxwell, Voight-Kelvin, mixed parallel-serial model), energy absorption and damping in viscoelastic bodies, natural decay and logarithmic damping, quality factor. Relaxation modulus in polymers, thermoelastic effect, Snoek effect in bcc crystals, other absorption mechanisms. Rheological considerations, Deborra number, and relaxation times. Viscoelastic aftereffect, elastomers, and the effect of polymer structure on the mechanical properties.

5. יסודות תורת הנקעים ודפורמציה פלסטית: חוזק תיאורטי של גבישים ו"המצאת הנקע", סקירה היסטורית. הגדרת נקע קצה ואנלוגיות, הגדרת רוחב הנקע ומאמץ פיירלס-נאבארו, היווצרות וריבוי נקעים, מקור פרנק-ריד. הגדרת מעגל בורגרס והגדרת נקעי קצה, בורג, ומעורבים. לולאות נקעים. תנועה משמרת ולא משמרת. הסכם הסימנים עבור נקעי קצה ובורג באמצעות חוק יד ימין (RH/SF) גורמים. קווי ופסי החלקה. מאמץ גזירה מופרד וחוק שמיד. מערכות החלקה, החלקה קלה וקשה, קריטריון פון מיזס לחומר משיך, החלקה צולבת. כניעה בגביש יחיד באמצעות פקטור שמיד, OILS לגבישים קוביים, והשלכה סטראוגרפית. משולשי מאמץ. סיבוב מישורי הסריג במהלך הדפורמציה והשלכותיו על כניעת הגביש. השלכות על התנהגות רב-גביש ומקדם טיילור. נקעים במבנים צפופי-אריזה, פירוק לחלקיים של שוקלי, והיווצרות משגי הערמה. אנרגיית משגה הערמה, פגמים משטחיים נוספים, ודפורמציה באמצעות תאומים – תאומי גידול ותאומי דפורמציה. נקעים ניידיים ונייחים – נקע פרנק, וחסמי לומר ולומר-קוטרל. נקעים במבנים גבישיים אחרים. טיפוס נקעים והיווצרות מדרגות (גיוגים וקינקים). הקשר בין צפיפות נקעים לדפורמציה פלסטית (פיתוח משוואת לודוויק) ומשוואת טיילור-אורוון. אנרגיות ושדות מאמצים ועיבורים סביב נקעי קצה ובורג תוך שימוש במכניקת הרצף. מערכת תרמודינמית למציאת עבודה הנעשת עיי הנקעים. כוחות על נקעים ומשוואות פיץ-קוהלר. חישוב מאמץ סף להפעלת מקור פרנק-ריד. כוחות בין נקעים וסידורם בקירות וסריגי טיילור. אינטראקציות בין נקעים לפגמים נקודתיים. הערמות נקעים על גבול גרעין ומציאת מאמץ פריצת הגבול.

5. Elements of dislocation theory and plastic deformation: theoretical crystal strength and "invention of dislocation", historical survey. Definition of edge dislocation and analogies, dislocation core and Peierls stress, nucleation and multiplication of dislocations, Frank-Reed sources. Burgers circuit around edge, screw and mixed dislocations. Dislocation loops. Conservative and non-conservative motion. Signs convention for edge and screw dislocations (RH/SF, etc), right and left hand rules. Deformation lines and bands. Resolved shear stress and Schmid's law. Slip systems, hard and easy slip, Von Mises criterion for ductile materials, cross-slip. Deformation in single crystals from Schmid's law, OILS rule for cubic crystals, and stereographic projection. Stress triangles. Plane rotation upon deformation and its effects on the yield process. Deformation in polycrystals and Taylor factor. Dislocation in close-packed crystals and split into Shockley partials, formation of stacking faults. Stacking fault energy, and other 2D defects. Deformation by twins. Sessile and glissile dislocations – Frank dislocation and Lomer and Lomer-Cottrell barriers. Dislocation in other structures. Dislocation climb and step formation (jogs and kinks). Dislocation density – plastic deformation relations, Taylor-Orowan and Ludwick equations. Continuum mechanics approach to energies and stress-strain fields around dislocations. Thermodynamic work done by dislocations and forces on dislocations (Peach-Koehler forces). Calculation of threshold stress to operate Frank-Reed source, interactions and forces between dislocations and formation of dislocation walls and Taylor lattices. Dislocation – point defect interactions. Dislocation pile-ups and grain boundaries and breakthrough stress.

Recommended reading:

ספרים מומלצים:

- Dieter G. E., *Mechanical Metallurgy*, 3rd edition, McGraw-Hill, NY, 1986.
- Hosford, W. F., *Mechanical Behavior of Materials*, Fourth Edition, Cambridge University Press, N.Y., 2005.

מבנה הציון:

15% תרגילי בית (חובת הגשה, שקלול מותנה בציון עובר בבחינת סמסטר)
85% בחינת סמסטר

קורסי קדם: מבוא למדע והנדסת חומרים, מכניקת מוצקים.

Grade: 15% homework (mandatory, pending passing grade at the final examination) + 85% final examination.

Prerequisite: 0581.2111 Introduction to Materials Science and Engineering