

Barkhausen Inspection

Jeffrey S. Ceurter (American stress Technologies, Inc., Pittsburgh, Pennsylvania)
Chad Smith and Roy Ott (Harley-Davidson Motor Company, Milwaukee, Wisconsin)

תופעת Barkhausen Noise (להלן: BN), נוצר על ידי שינויים פתאומיים בחומרים שעליהם מופעל מיגנט בזרם חילופין. ידוע ששינויים אלה מושפעים ממבנה החומר ברמת המיקרו שלו, מנוכחות של כוחות אלסטיים ומפיזורם. במקרה של נזק עקב שחיקה, ניתן לעקוב גם אחר העומס השירי וגם אחר השינויים המיקרו מבניים.

במאמר זה נסקור את התיאוריה של BN, תוך התמקדות על היישום בבדיקת לא הורסות של נזק עקב שחיקה בחומרים פרו-מגנטיים (ferromagnetic). נדון כאן בתיאוריה של השחיקה בנוגע למיקרו-מבנה ולשינויים בעומס שירי, ונביא דוגמאות המראות כיצד ניתן להעריך בשיטה זו שינויים אלה.

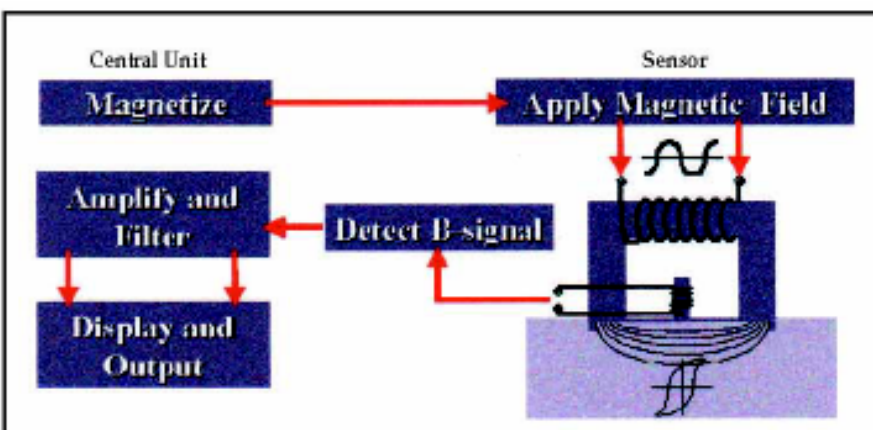


Fig. 1 — Instrumentation required for Barkhausen noise analysis.

אמצעים ושיטות

האמצעים הנדרשים כדי לעקוב אחר סיגנלים של Barkhausen מתוארים בתרשים מספר 1. כדי ליצור BN, מחוללים שדה מגנטי באמצעות אלקטרומגנט על גבי חומר פרומגנטי. החומר מגיב לשדה המגנטי ויוצר התפרצויות Barkhausen (ע"ש המדען הגרמני מאוניברסיטת דרזדן שגילה תופעה זו בשנת 1919), הנקלטות על ידי סנסור הכולל סליל חשמלי (מותקן פיזית יחד עם האלקטרומגנט באותו הפרוב). האות מוגבר ומסונן. האמפליטודה מחושבת על ידי שווה-ערך ל-RMS (Root Mean Square) של הגל המגנטי הנוצר עקב זרם-החילופין, והנתונים מומרים דיגיטלית לצורך העברתם למחשב והצגתם.

ניתן ליישם עקרון זה לצרכי בדיקה מכיוון שכאשר ממקמים שדה אלטרומגנטי סמוך לחומר פרו-מגנטי, החומר עובר שינויים מגנטיים בלבד. שינויים אלו הם תוצאה של תנועות מיקרוסקופיות של קירות האתר המגנטי (הקרוי: Domain), המצויים בתוך החומר. כאשר נעים קירות ה-domain, הדבר מעורר פולס חשמלי שניתן לעקוב אחריו על ידי סליל מוליך הממוקם

An APPROVED MINISTRY of DEFENSE SUPPLIER

Office: 21st, Atir-Yeda St. Kfar-Saba 4464316, Israel
 Phone: +972-9-7674431
 Fax: +972-9-7676898
 Mail: P.O.Box 3008 Hod-Hasharon 4513001, Israel
 Web: www.rbmltd.co.il
 e-mail: rbmltd@inter.net.il

ISO 9001:2015
RONET
 Quality Management System

משרדים:
 עתיר ידע 21, כפר-סבא 4464316
 דואר:
 ת.ד. 3008, הוד-השרון, 4513001

בסמוך. פולסים עדינים אלה נמדדים כ-bulk (צבר של האותות) כאשר התוצאה היא הכפלה של אלפי פולסים חשמליים אליהם מתייחסים כ-BN. האמפליטודה של אות זה נקרא "מדד מגנטו-אלסטי" (magneto-elastic parameter- MP). האמפליטודה מושפעת מכל דבר המונע את תנועת קירות ה-domain, כולל האצה, חריגה מהמקום, גבולות מגרענים (grained) ועומס שיורי. פקטורים אלה יכולים להיחשב כשייכים ל-2 קטגוריות: קשיות ועומס שיורי.

- הרעש מוגבר: אפקט BN מוגבר כאשר ישנה ירידה בקשיות ועליה בכוחות המתיחה.

- הרעש מופחת: אפקט BN יורד עם עליה בקשיות ועליה בכוחות דחיסה. עיקרון זה מודגם באיורים 2,3.

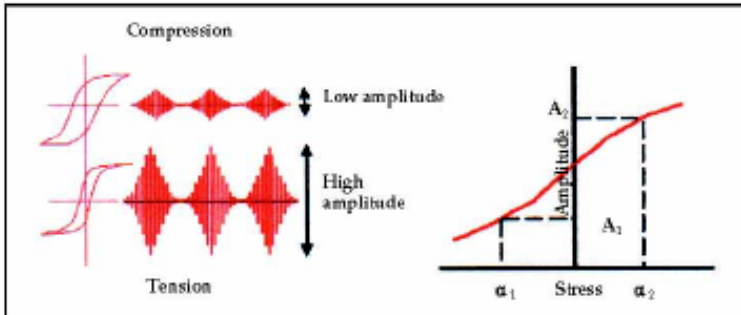


Fig. 2 — Barkhausen noise amplitude vs. stress

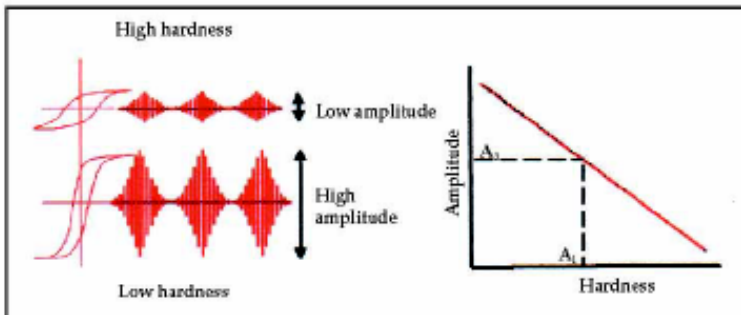


Fig. 3 — Barkhausen noise amplitude vs. hardness.

An APPROVED MINISTRY of DEFENSE SUPPLIER

Office:
21st, Atir-Yeda St. Kfar-Saba 4464316, Israel
Mail:
P.O.Box 3008 Hod-Hasharon 4513001, Israel

Phone: +972-9-7674431
Fax: +972-9-7676898
Web: www.rbmltd.co.il
e-mail: rbmltd@inter.net.il

ISO 9001:2015
RONET
Quality Management System

משרדים:
עתיר ידע 21, כפר-סבא 4464316
דואר:
ת.ד. 3008, הוד-השרון, 4513001

נזקים לחומר

- נזק עקב חיכוך: נזק עקב חיכוך נוצר עקב אנרגיה שהותמרה לחום. חום זה מרוכז בשכבות השטחיות יותר של החומר ויכול לגרום להשפעה הרסנית אם לא יטפלו בו בצורה נכונה. הגורמים המשפיעים על עליית הטמפרטורה בשכבה השטחית כוללים את סוג הנוזל המקרר את החומר שעובר חיכוך, ריכוז הנוזל המקרר, גילו, הזרימה שלו, סוג הגלגל השוחק, מהירותו, מצב הבליה שלו, קצב ההזנה שלו ותהליכים קודמים שעבר החומר. במחקר של נזקי שחיקה, Wojtas וחבריו (1) מסבירים שנזק יכול להתחיל בהרפייה חלקית של כוחות דחיסה בטמפרטורות מתחת ל- 500°C .
- כוויה בעקבות תהליך re-tempering: כאשר הטמפרטורות עולות עד לקרוב ל- 600°C , מופיעים נזקים טרמאליים מסוג B class, הידועים גם ככויות re-tempering. ההשפעה היא מעבר ל- tempering, וגורמת לירידה בקשיות פני השטח ולהתחלה של כוחות מתיחה.
- כוויות עקב re-hardening: עליה נוספת של הטמפרטורות מעבר ל- 720°C גורמת לשינויים טרמאליים מסוג D-class, הידועים גם ככויות re-hardening. נזק זה כולל אזורים של חומר קשה מאד וגס, כמו גם אזורים מסביב עם כוויה מסוג B-class, עם חומר "רך".
- עומס שיורי: העומס השיורי הנו עומס מורכב, בגלל שעל פני השטח ישנן רמות שונות של נזק. אזורים מסוימים נמצאים תחת מאמץ דחיסה בעוד שאחרים תחת מאמץ מתיחה. הטכניקות הקיימות כדי לעקוב אחר סוגי נזקים אלה כוללות בדיקה חזותית באמצעות Nital etching, בדיקות של מיקרו קשיות, יצירת פרופיל של עומס שיורי באמצעות X-ray diffraction ו- BN. עם זאת, אפשר לעקוב אחר כל אחד מהנזקים באמצעות ANALYSIS BN (BNA) בדרך שהיא לגמרי לא-הורסת.

טכניקת ה- X-ray diffraction אמנם מתאימה גם היא, אך היא אורכת זמן רב, יקרה

Comparison of nital (temper) etch, micro hardness, and Barkhausen noise analysis

Method	Barkhausen method	Temper etch	Micro hardness
Nondestructive	Yes	No	Yes
Use of chemicals	No	Yes	No
Automated	Yes	No	No
Reliable	Yes	No	No
Evaluation through coatings	Yes	No	No
Danger of hydrogen embrittlement	No	Yes	No
Influenced by both stress and microstructure	Yes	No	No

והרסנית. Nital etching וטכניקות לבדיקת מיקרו-קשיות הינן מהירות וקלות לביצוע, אולם יכולות לאתר נזקים רק מסוג B-class, D-class. בנוסף, בדיקות קשיות הנן הרסניות ובדיקת Nital etching הנה בדיקה סובייקטיבית.

הטבלה מדגימה כמה מהמאפיינים של BNA, בהשוואה ל-Nital etching (temper). ציורים 2,3 מראים שאות ה-BN עולה ככל שהקשיות יורדת ולכוחות המתיחה. זהו התסריט המדויק לכוויות חיכוך עקב תהליך re-tempering, כפי שרואים בתרשים 4. מכיוון שנזק חיכוך משפיע על הקשיות והעומס באופן המעלה את אות ה-Barkhausen, המעקב אחר נזק החיכוך הוא די פשוט: אם האמפליטודה עולה, הדבר מראה על כך שהחומר נשרף. יוצא מן

An APPROVED MINISTRY of DEFENSE SUPPLIER

הכלל כאן הוא לגבי אזורים שעברו חיסום. במקרה זה האות יכול לרדת; עם זאת, אזורים אלה תמיד מוקפים על-ידי אזורים מאד מוקשחים מחדש, המראים אמפליטודה גדולה של BN.

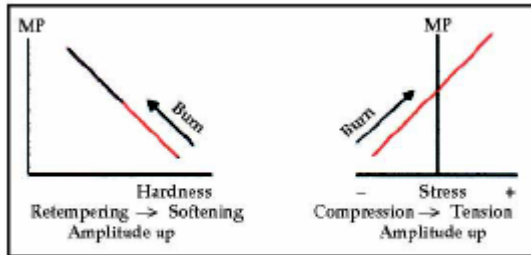


Fig. 4 — Effect of grinding burn on Barkhausen noise signal. Retemping burn increases the amplitude of the Barkhausen noise signal.

מערכת לבדיקת גלגלי שיניים

מערכת הבדיקה לגלגלי שיניים כוללת linear X-Y motion-controlled sensor, מרכז "חי", מלחציים בעלי 3 צבתות עם סיבוב המפוקח על-ידי תוכנה, אנאלייזר BN, מחשב, איסוף נתונים ותוכנה לביצוע אנאליזה.

המדדים לסיבוב ותנועה X-Y מתוכנתים למחשב לגבי כל סוג הגלגל ולאחר מכן המפעיל מתקין את הגלגל באופן ידני, בוחר את סוג הגלגל מהתוכנה, ולוחץ על כפתור start. שאר ההפעלה כולה אוטומטית. הגשש נע לתוך מקומו על שן הגלגל, אחר-כך סורק בצורה צירית את המיקומים שהוגדרו מראש, עד לארבעה מיקומים לכל שן. לאחר מכן הגלגל מסתובב מעט, כך שגשש יוצר מגע עם הצד הנגדי של השן. בשלב הבא הגשש מתרחק כך שהגלגל ייטב מעט על מנת לבדוק את השן הבאה. התהליך ממשיך למספר השיניים שהוגדר מראש, והתוצאות לגבי כל סריקה מוצגות על צג המחשב יחד עם אבחנה של Accepted / Rejected. – הכל לפי תנאי הדחייה שתוכנתה.

אפשר להתקין את המערכת כדי לבדוק שן אחת או את כולן, ואפשר לתכנת אותה כדי לבדוק שן אחת, לדלג על חמש ולבדוק את השישית וכן הלאה. התקנה אופיינית היא לבדיקה של ארבע שיניים הנמצאות כ-90 מעלות זו מזו, 2 סריקות לכל אגף. סטטיסטית, בדיקה בשיטה זו מקצרת את זמן הבדיקה מבלי לפגוע באמינותה. בסיום הבדיקה, ניתן לשמור את התוצאות במחשב או לשלוח הדפסת דוח.

קביעת קריטריונים

כדי לקבוע קריטריונים לקבלה ודחייה בשיטת BNA, חייבים למצוא מתאם בין אות ה-BN למדידות בשיטות אחרות של חומרת הכוויה, כגון Nital etching, ובהתאם לנתונים ההשוואתיים לקבוע את הקריטריונים.

אחת מדרכי הבדיקה הפשוטות מבוססת על העובדה שניתן לשייך את ערכי המדד המגנטו-אלסטי (MP) ישירות לתוצאות של בדיקה ויזואלית בשיטת Nital etching. על-ידי מדידת מגוון של חלקי ייצור והשוואתם לבדיקת Nital etching, ניתן לכמת את מידת הכוויה דרך מידת אות ה-BN, או ה-MP. על ידי בחינת המתאם, יוצרים את הקריטריון לפיו יידחה המוצר. הקריטריון מוכנס למחשב לגבי כל סוג גלגל שיניים.

An APPROVED MINISTRY of DEFENSE SUPPLIER

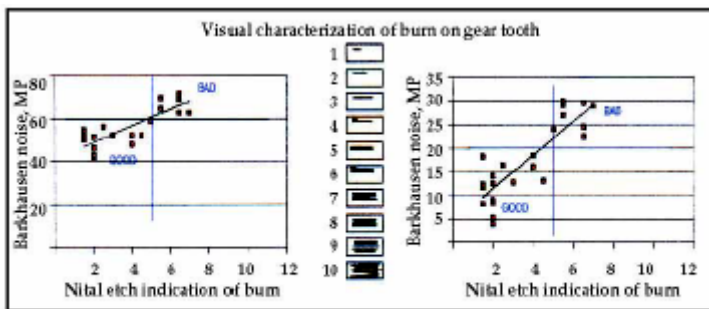


Fig. 5 — (a) Maximum MP correlation with nital etch. (b) Difference (Maximum minus Minimum) MP correlation with nital etch.

ציורים 5a, 5b מראים דוגמא להתקנת הבדיקה של סוג אחד של גלגל שיניים במערכת ממסר של אופנועים. הציורים מדגימים מתאם בין MP והאינדיקציה הויזואלית של כווייה מ-Nital etching. ציור 5a הנו מתאם למקסימום ערכי MP שנמדדו בכל הסריקות של הגלגל שיניים, בעוד שציור 5b הנו מתאם של ההבדלים בין ערכי מקסימום / מינימום של MP, שנמדדו בכל הסריקות של הגלגל שיניים. בכל גרף הוסיפו חץ המצביע על הקריטריון לדחייה. בכל מקרה, הרביע השמאלי התחתון של הגרף מצביע על דוגמא שהתקבלה, בעוד שהרביע הימני העליון מראה על דוגמאות שנדחו.

על-ידי קביעת גבול הדחייה המקסימלי ל-PM 60 ומרווח הגבול של הדחייה ל-MP 20, כל החלקים שנדחו על ידי Nital etching יידחו גם בשיטת BNA. הדוגמא שניתנה מראה פיזור בנתונים וזה רק לגבי קבוצה קטנה של חלקים.

בהתבסס על דוגמא זו, כדאי לנהוג בחכמה ולבחור קריטריונים לדחייה שהם מעט נמוכים מאלה עליהם הצבענו. אמנם זהו צעד שמרני אך עם זאת הוא מבטיח שלא יאושר לקבלה אף חלק האמור להדחות. כדי להעלות את הביטחון בתוצאות, כל המתאמים הסופיים נעשים על קבוצות של 60 דוגמאות, הנבדקות על-ידי 3 משתמשים שונים. טכניקה זו מעלה עוד יותר את הביטחון בקריטריון לדחייה ומגבילה את הצורך באנאליזה נוספת של הגלגל שיניים. כאשר מתקבלת תוצאת בדיקה שקרובה או מעל הקריטריון לדחייה, שכיח שבודקים את החלק גם באמצעים של Nital etching. האנאליזה הנוספת מבטיחה תוצאות אמינות וחשובה במיוחד אם הקריטריונים בוססו על קבוצות קטנות של חלקים.

יתרונותיה של הבדיקה בשיטת Barkhausen

- **איתור מוקדם של נזקים:** נזקי חיכוך נובעים בדרך-כלל מבלאי של גלגלים, אבל יכולים להיגרם גם מקצב הזנה לא נכון, מהירות הגלגל או שינויים שונים אחרים. במחזור ייצור המפיק מספר גדול של חלקים מידי שעה, חיוני לאתר שגיאות במהירות. תהליך הבדיקה בשיטת Nital etching אורך מספר דקות, ולא תמיד ניתן לשלבו בקו הייצור, עקב כך, חלקים עוברים צריבה מידי שעה או אף בתדירות פחותה, מה שיכול לגרום לנזק אדיר בזמן ובעלות ייצור החלקים הפגומים. בשיטת Barkhausen ניתן ליצור מעקב מהיר אחר איכות הייצור ובכך לחסוך כסף רב. חלק מהמשתמשים דיווחו על החזר השקעתם בתוך כשלושה חודשים.

An APPROVED MINISTRY of DEFENSE SUPPLIER

Office:
21st, Atir-Yeda St. Kfar-Saba 4464316, Israel
Mail:
P.O.Box 3008 Hod-Hasharon 4513001, Israel

Phone: +972-9-7674431
Fax: +972-9-7676898
Web: www.rbmltd.co.il
e-mail: rbmltd@inter.net.il

ISO 9001:2015
RONET
Quality Management System

משרדים:
עתיר ידע 21, כפר-סבא 4464316
דואר:
ת.ד. 3008, הוד-השרון, 4513001

- **תיעוד תוצאות:** האמפליטודה של BN (ערכי ה-MP) נרשמת לגבי כל חלק נבדק והנתונים יכולים להישמר ולהיסקר מחדש במקרה הצורך. בשיטת Nital etching אין רישום ותיעוד מלבד רישום ידני, בנוסף לכך בשיטת ה-etch (צריבה) קיימת אפשרות גדולה יותר לטעות אנוש.
- **רישום ותיעוד בקרת איכות הביצוע:** התוצאות יכולות להוות בסיס לניתוח סטטיסטי.
- **ירידה בתיקונים בתקופת אחריות:** הבדיקה מביאה לירידה או אפילו להפסקה מוחלטת של החזרת חלקים בתקופת האחריות עקב טענות על פגמים. בזכות המיזן המוקדם של חלקים פגומים, כבר בתהליך הייצור.
- **הוצאות אחזקה נמוכה:** אין צורך בכימיקלים או חומרים מתכלים אחרים מכל סוג שהוא.

יישומים נוספים:

השיטה מיושמת בהצלחה בתחומים רבים, כגון בדיקת יעילות של פין גזירה, מדידת העומס השיורי וניבוי עייפות החומר. דוגמאות: איתור נזקי חיכוך על זיזים, על גל ארכובה, מתלים, כני נשא, גלגלי שיניים נחיתה של מטוסים (גם מכרום), העלאת טווח העייפות של כני נשא, מדידת יעילות פני גזירה ביציקות ומדידת ההשפעות של יישור על גלי ארכובה.

(1)

VERIFICATION OF THE SURFACE INTEGRITY OF ENGINE COMPONENTS USING THE MAGNETIC BNA METHOD

Andrzej S. Wojtas,
Brian A. Shaw,

Stresstech - AST, Westerburg, Germany.
Design Unit, Department of Mechanical, Materials and
Manufacturing Engineering,
The University of Newcastle, UK.

ידי רונית גלעד, חברת ר.ב.מ.

המאמר תורגם על-
בע"מ בקרה ומיכון,
www.rbmltd.co.il

נציגי חברת



המפתחת ומייצרת מיכשור לבדיקות בשיטת Barkhausen.

An APPROVED MINISTRY of DEFENSE SUPPLIER

Office: 21st, Atir-Yeda St. Kfar-Saba 4464316, Israel
Phone: +972-9-7674431
Fax: +972-9-7676898
Mail: P.O.Box 3008 Hod-Hasharon 4513001, Israel
Web: www.rbmltd.co.il
e-mail: rbmltd@inter.net.il



משרדים: עתיר ידע 21, כפר-סבא 4464316
דואר: ת.ד. 3008, הוד-השרון, 4513001