



## **ОБОБЩЕНИЯ ЗА ВЪЗНИКВАЩИ ОСТАТЪЧНИ НАПРЕЖЕНИЯ. ИДЕЯ И ИЗСЛЕДВАНИЯ, СВЪРЗАНИ С КОНКРЕТНИ ПОЛЗИ В ОБЛАСТТА НА МАШИНОСТРОЕНЕТО**

**Николай Тончев, Величко Мачев**  
[tontchev@vtu.bg](mailto:tontchev@vtu.bg) [vmatchev@vtu.bg](mailto:vmatchev@vtu.bg)

*Висше Транспортно Училище „Тодор Каблешков“,  
1574 София,  
БЪЛГАРИЯ*

***Ключови думи:** остатъчни напрежения, фазови трансформации, йонно азотиране, анализ на Шум на Баркхаузен (BNA).*

***Резюме:** В изследването е обоснована възможността за прилагане на анализ на шума на Баркхаузен (BNA), като подходяща техника и средство за оценка на свойствата на материали на желязна основа. Намерено е доказателство, че дълбочина на слоеве, с различни структури, предизвиква остатъчни напрежения с различна стойност. Цитираните в това проучване изследвания са валидирани чрез класически методи, което дава основание да се счита, че предложеният подход, действително може да се приложи, като надеждно средство, гарантиращо достатъчна точност.*

### **I. ВЪВЕДЕНИЕ**

В промишлеността оценката по различни наблюдавани критерии на изделието е решаващ фактор за осигуряване на крайното му качество. Поради това компаниите са склонни да инвестират в подходи, методи и алгоритми, подпомагащи този процес. Един утвърден метод е металографският анализ, който отговаря за вида и количеството на фазите. За да се реализирането му обаче е необходим дълг срок за изпълнение, разрушаване на произведена продукция и съответно загуба на финансови средства. Тази идея е развита в [1], където състоянието на зоната в близост до повърхността, разпределението на твърдостта и остатъчното напрежение се влияят от параметрите на обработка. Доказано е, че конвенционалните методи трудно се прилагат за изпитване в реално време. Следователно има значителна необходимост от техники за безразрушителен контрол. Освен добре познатите разрушителни методи, вихровите токове, магнитните и ултразвуковите техники също могат да се използват за измерване на микроструктурни параметри и остатъчни напрежения. Именно за това използването на безразрушителна оценка се приема като по-привлекателна идея, тъй като това би позволило да се намалят всички неудобства, упоменати по-горе. Правена е оценка на проби, обработени с процесите на азотиране [2] чрез вихровите токове, като избрана техника за безразрушителна оценка. Независимо от това, че за утвърждаването на този метод е направено сравнение с класически методи на изследване, статията доказва, че подобна методика е сложна за предсказване на предварително поставени цели.

Например, при използването на различните марки стомана, за да се определи дебелината на слоя на съединението с едно и също калибриране на вихров ток, е установено, че върху точността на измерването влияние оказва поръзността на пробата. Заключение на цитираното изследване е, че намирането на нов свършен инструмент за вихрови токове, служещ за измерване на дебелината на слоя на съединението се оказва сложно, в съответствие със съществуващото оборудване със сходно приложение, което се счита за оскъдно.

Независимо от това, че повърхността на третираните детайли представлява само няколко процента от обема на целия елемент, то въздействия върху нея резултат в съществени изменения с ползи към функционално поведение, качество и време на употреба. Следователно, анализите и принципите на измерване, с възможност да открият подходящи ефекти и влияния, са от все по-голямо значение. Тези анализи трябва да отговарят на промишлени цели, като точност, време за измерване, устойчивост и разходи. Ефективно решение на такъв комплексен въпрос може да бъде възможността за интегриране в производствената линия на средство за измерване и контрол без разрушаване с удовлетворителна точност. Усилия в тази насока се проявяват от различни организации, вкл. и Европейската Комисия, чрез което са финансирани и няколко проекта, като:

- INNOVATIAL - иновативен проект за методи за безразрушителен контрол на материалите, включително чрез използването на анализ на Шум на Баркхаузен (BNA).

- MAGNTEST – приложен метод за ефективна детекция на микроструктурни промени и остатъчни напрежения в компоненти на желязна основа.

- Изследвания на TWI (The Welding Institute) - TWI има редица проектни изследвания и разработки в областта на безразрушителния контрол, включително използването на анализ на Шум на Баркхаузен (BNA).

- FEMAG - развитие на нова технология за безразрушителен контрол на база анализ на Шум на Баркхаузен за оценка на вътрешни напрежения и дефекти в различни индустриални приложения.

Състоянието на техниката на безразрушителните методи за измерване е обобщено от E. Brinksmeier на ASPE-Meeting още през 1989 г. [3]. Тогава се предлага използването на Mirage effect и неговото локално измерване под повърхността, чрез който може да се получи безразрушително профилиране на дълбочината на повърхностните повреди. Специален интерес се отделя върху измервателните устройства и методи, подходящи за инсталиране в или близо до производствена линия, т.е. различни от строго лабораторни инструменти. Само няколко метода за измерване предлагат директен достъп до свойствата под повърхността.

Повечето производствени процеси са свързани със значително количество различни по характер и знак остатъчни напрежения. Не всички от тях обаче влияят неблагоприятно към обектите на изследване, тъй като някои от тях са причина за уякчаването на метални материалите. Основните механизми, генериращи остатъчно напрежение, са пластичното деформиране от различен характер, температурните градиенти вследствие на заваряване, термична обработка и обикновено комбинацията от два или повече от тези ефекти е отговорна за крайните остатъчни напрежения. Независимо от положителния ефект който беше споменат, остатъчните напрежения се сумират с приложените стойности на работните напрежения. Полученият в този случай резултат за конструкцията, детайла или изделието е възможно да причини пукнатини или крайна остатъчна деформация, които в практиката да доведат до брак.

Целта на направеното изследване е да определи остатъчните напрежения по характер и природа, след което да дефинира пряк или косвен начин за тяхното

установяване. На тази база е необходимо да се изрази идея, въз основа на която да се предложи решение, заложено в самото въведение.

## II. ОТНОСНО ОСТАТЪЧНИТЕ НАПРЕЖЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНИ ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРОЦЕСИ

При изследванията на йонно азотирани слоеве появата на вътрешни напрежения е породена от комбинацията на термична и обемна промяна, вследствие дифундирането на азота в повърхностният слой. Този случай се отразява на коефициентите на топлинно разширение на различните фази, които се различават по обем. За да се подредят по дълбочина от повърхността към сърцевината в азотираният слой, различните фази трябва да се дефинират. Това е реализирано в [4], като различните фази, съответно като  $\epsilon$  (железен нитрид,  $\text{Fe}\square\text{-}\square\text{N}$ ),  $\gamma'$  (железен нитрид,  $\text{Fe}\square\text{N}$ ),  $\alpha'$  (ферит с азот), както и потенциално други азотни съединения и карбиди, в зависимост от легиращите елементи на стоманите и параметрите на режима йонно азотиране. На така определените фази може да се посочи, че формираната зона с фаза:

- $\epsilon$  ( $\text{Fe}\square\text{-}\square\text{N}$ ), се свързва с високи остатъчни напрежения поради максимално разширяване на решетката при вграждане на азотни атоми. Този ефект отговаря на най-висока твърдост и износоустойчивост.
- $\gamma'$  ( $\text{Fe}\square\text{N}$ ), свързана с подповърхностния слой допринасящи за високи остатъчни напрежения, но малко по-ниски в сравнение с фазата  $\epsilon$ .
- $\alpha'$  (ферит с азот), последна част на вътрешния слой преди не азотираната основа. В този слой, който се характеризира с по-голяма дълбочина в материала, е поместен азот в твърд разтвор, което води до сравнително по-ниски остатъчни напрежения в сравнение с фазите  $\epsilon$  и  $\gamma'$ .

В [5] е показан начин за безразрушително определяне на остатъчните напрежения в заварените стоманени планки чрез техниката на Magnetic Barkhausen Noise (MBN). Установено е, че основното в подобно изследване се състои в установяване на настройката за калибриране на MBN-контрола в системата за измерване на остатъчно напрежение чрез сканиране. Подобен проблем за контрола на точността и ефективността от изследванията, се наблюдаваше и при нашите изследвания до разработването на система и процедура бяха извършени различни измервания на MBN.

Резултатите в нашият случай на MBN бяха проверени чрез методиката [6], свързана с изследването на топлоустойчиви стомани. Тези наши изследвания бяха приложени за друг вид обработване, но с тях ние доказахме общовалидността на проблема в областта на машиностроенето. За обосноваването на верността на методиката бяха извършени микроструктурни, микротвърдостни и изпитвания на износване и това доведе до заключението, MBN е много обещаващ метод за безразрушително, бързо и точно прогнозиране на остатъчните напрежения.

Сравняването на така разгледаните два случая може да открие разликите във вътрешните напрежения в азотирания слой и тези в зоната на термично влияние (ЗТВ) при заваряване по своя произход, природа и разпределение. При азотирания слой, вътрешни напрежения в слоя са свързани с разширяването на кристалната решетка поради дифузията на азот в повърхностния слой и металабразуването на твърди фази. Ефектът от това е увеличение е повишаване на твърдостта и износоустойчивостта. Вътрешните напрежения в азотирания слой могат да допринесат за повишена устойчивост на умора и корозия.

За разлика от механичния характер на остатъчните напрежения при азотиране, тези при заваряване се характеризират изцяло с термичен произход. Заваряването включва локално нагряване и последващо охлаждане на материала, което води до

термични напрежения поради неравномерното разширение и свиване на различните зони. Механичният произход в този случай е свиването и разширяването в различното по време на заваряването, водещо до напрежения и деформации. Фазовите трансформации при легираните стомани предизвикват фазови преходи между аустенит и мартензит които също причиняват вътрешни напрежения. От изброеното, зоната около заваръчния шев се характеризира със значителни градиенти на напреженията от шева към основния материал, което може да доведе до пукнатини и деформации.

Конкретният извод от това сравнение, е че при азотирания слой, напреженията намаляват от повърхността към вътрешността и те са желателни, докато в зоната термично влияние има значително по сложен градиент на напрежения около заваръчния шев и поради възникващ риск те са не желани.

В подкрепа на всичко казано е изследването [7], където зоната на термично влияние е изследвана с различни диаграми за непрекъсната трансформация на охлаждането. Така изследваните ефектите от промяната на обема, се дължат на аустенитно-мартензитната трансформация, върху крайното остатъчно напрежение при заваряването. Беше доказано, че тази промяна в обема, може да бъде уловена по безразрушителен способ.

### **III. ОСОБЕНОСТИ И ОБЛАСТИ НА ПРИЛОЖЕНИЯ НА ПРЕДЛОЖЕНИЯТ МЕТОД ЗА АНАЛИЗ**

През последните пет години анализът на Шум на Баркхаузен е обект на множество изследвания в областта на вътрешните напрежения в структурите. Средно, около 20-30 изследвания годишно разглеждат този метод. Ето няколко примера на изследвания, първо от Университета в Кеймбридж:

- Използването на анализ на Шум на Баркхаузен за оценка на остатъчни напрежения в стоманени мостови конструкции, показва, че методът е точен и надежден за откриване на остатъчни напрежения, като същевременно се избягва необходимостта от допълнителни изпитвания. [8].
- Изследвано е прогнозирането на остатъчното напрежение и твърдостта на проби от сплави на желязна основа въз основа на анализ на Шум на Баркхаузен. Основан на тълкуване на данни, този подход изгражда устойчив модел за прогнозиране, състоящ се в идентифициране на модел и стъпки за валидиране. Този алгоритъм е определен, като базов, защото е однован на линейна регресия. По време на валидирането точността на прогнозиране е доказана, че е добра, което показва, че предложената схема за моделиране може да се приложи за прогнозиране на свойствата на материала. [9].
- В Техническият университет в Мюнхен, мониториране на Шум на Баркхаузен е използвано за вътрешни напрежения в заваръчни съединения на тръбопроводи. Натрупаният опит показва висока чувствителност и точност при оценката на напрежения в заваръчни съединения, предлагайки надеждно безразрушително решение.
- В Националния институт по стандарти и технологии (NIST, САЩ) е извършено изследване за контрол на качеството на термично обработени детайли на желязна основа. Потвърдено, е че методът може ефективно да открива вътрешни напрежения и структурни дефекти след термообработка.
- В Техническият университет в Делфт е приложен анализ на Шум на Баркхаузен за оценка на вътрешни напрежения в авиационни компоненти. Показана е висока точност и надеждност при откриване на остатъчни напрежения и структурни аномалии в авиационни материали.

- Анализът на магнитния шум на Баркхаузен (BNA). е [10] използван за безразрушителна оценка на износване на компоненти в експлоатационни условия. Успешно са установени количествените връзки между трибологичните индикатори и състоянието на напрежение.
- Измервания на магнитния шум на Баркхаузен (MBN) са направени върху проби от горещо валцована мека стомана, едноосно деформирани с различна степен на деформация [11]. Резултатите са показали първоначално увеличение на шумовите стойности с увеличаване на пластичната деформация, последвано от намаляване при по-високи пластични деформации. При още по-високи пластични деформации е установено, че шумовите стойности са почти независими от пластичната деформация.
- Безразрушителна техника основана на шум на Баркхаузен при установяване на профил на дълбочина на остатъчното напрежение в шамповани образци, чрез сплескване е изследвано в [12]. Измерените шумови стойности и стойностите на остатъчното напрежение са проверени чрез рентгенова дифракционна техника.

Тези достижения ни насочиха към метода на анализ на шум на Баркхаузен (BNA), като избор на подход за постигане на нашите цели: Установяване на напрежения от фазови превръщания в топлоустойчиви стомани по време на азотиране. Подобен успех ще разшири приложението и значителния интерес в специфичната индустриална и научна област.

Анализ на магнитния шум на Баркхаузен (BNA), е приложим за феромагнитни материали. Изследваният обем е съставен от магнитни области с малък порядък, наречени домейни. Домейнът се характеризира с оси на кристалографската посока на магнетизиране. С възможността за метод изследващ, толкова базово ниво е гаранция, че въпросът с остатъчните напрежения ще бъде надеждно разрешен. Векторите на намагнитване в домейна са ориентирани по такъв начин, че общата намагнитност на материала е нула. Домейните са разделени един от друг от стените на домейните, наричани още стени на Bloch. Границите на зърната, дислокациите на решетката, материалите от втора фаза и примесите в материала действат като пречка за движението на домейна. Доказано е, BNA е чувствителен към промени в приложеното напрежение, микроструктурни характеристики и състав на материала. Известно е, че напреженията на опън увеличават шумовите стойности, докато напреженията на натиск ги намаляват. Следователно измерените стойности на магнитния шум на Баркхаузен (MBN) могат да бъдат преобразувани в стойностите на остатъчното напрежение чрез използване на подходяща калибровъчна крива [13].

Когато променящо се магнитно поле се приложи към магнитен материал, стените на домейна се движат, така че домейните, подравнени близо до посоката на полето, растат за сметка на тези, които са по-малко подравнени. Движението се случва в поредица от внезапни скокове, водещи до магнитен шум на Баркхаузен (MBN). Анализът на MBN осигурява ефективна техника за безразрушителен тест за определяне на остатъчното напрежение в стоманата. [14].

#### **IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Чрез приложения е доказано, че възможността на анализа при шумът на Баркхаузен (BNA), като техника и средство, може да бъде използвано за оценка на свойствата на материали на желязна основа. Открито е, че слоеве с различна дълбочината сруктура, предизвиква остатъчни напрежение с различна стойност. Цитираните в това проучване изследвания са валидирани чрез класически методи, което дава основание да се счита, че предложението подход, действително може да се приложи, като надеждно средство, гарантиращо задоволителна точност.

### ЛИТЕРАТУРА:

- [1] E. Brinksmeier, E. Schneider, W.A. Theiner, H.K. Tönshoff, Nondestructive Testing for Evaluating Surface Integrity, CIRP Annals, Volume 33, Issue 2, 1984, Pages 489-509, ISSN 0007-8506, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(16\)30171-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(16)30171-8).
- [2] Waseem Akhtar, Ismail Lazoglu, Steven Y. Liang, Prediction and control of residual stress-based distortions in the machining of aerospace parts: A review, Journal of Manufacturing Processes, Volume 76, 2022, Pages 106-122, ISSN 1526-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.005>.
- [3] E. Brinksmeier, State-of-the-art of non-destructive measurement of sub-surface material properties and damages, Precision Engineering, Volume 11, Issue 4, 1989, Pages 211-224, ISSN 0141-6359, [https://doi.org/10.1016/0141-6359\(89\)90031-7](https://doi.org/10.1016/0141-6359(89)90031-7)
- [4] Бучков Д., В.Тошков, Йонно азотиране, Техника, София, 1975г, р.171.
- [5] H. Ilker Yelbay, Ibrahim Cam, C. Hakan Gür, Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique, NDT & E International, Volume 43, Issue 1, 2010, Pages 29-33, ISSN 0963-8695, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.08.003>.
- [6] Machev V.R., N. Tonchev, Methodology and Experience in Applying a Non-Destructive Testing Method by Barkhausen Noise Analysis, for Example, in Ion-Treated Samples, Environment. Technology. Resources. Rezekne, Latvia, Proceedings of the 15th International Scientific and Practical Conference, 2024, Veliko Tŕnovo.
- [7] Dean Deng, FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects, Materials & Design, Volume 30, Issue 2, 2009, Pages 359-366, ISSN 0261-3069, където <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.052>.
- [8] Gur, C. H. (October 3, 2018). "Review of Residual Stress Measurement by Magnetic Barkhausen Noise Technique." ASTM International. Matls. Perf. Charact.. October 2018; 7(4): 504–525. <https://doi.org/10.1520/MPC20170080>.
- [9] Gur, C. H. (October 3, 2018). "Review of Residual Stress Measurement by Magnetic Barkhausen Noise Technique." ASTM International. Matls. Perf. Charact.. October 2018; 7(4): 504–525. <https://doi.org/10.1520/MPC20170080>.
- [10] Qian, Z., Miao, X., Wang, J., Yang, C., Zhang, W., Chen, Z., ... Huang, H. (2024). Evaluation of the wear mechanism of ferromagnetic materials based on magnetic barkhausen noise. Nondestructive Testing and Evaluation, 1–20. <https://doi.org/10.1080/10589759.2024.2>
- [11] A. Dhar, L. Clapham, D.L. Atherton, Influence of uniaxial plastic deformation on magnetic Barkhausen noise in steel, NDT & E International, Volume 34, Issue 8, 2001, Pages 507-514, ISSN 0963-8695, [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00079-7).
- [12] Koh, W.Z.I., Wei, Y. (2022). Correlation Study Between Barkhausen Noise and Depth-Resolved Residual Stress Upon Shot Peening. In: Wei, Y., Chng, S. (eds) Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Surface Enhancement (INCASE 2021). INCASE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-5763-4\\_19](https://doi.org/10.1007/978-981-16-5763-4_19)
- [13] Blitz, J. (1997). Magnetic methods. In: Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing. Non-Destructive Evaluation Series, vol 3. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-5818-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-011-5818-3_3)
- [14] D.M. Stewart, K.J. Stevens, A.B. Kaiser, Magnetic Barkhausen noise analysis of stress in steel, Current Applied Physics, Volume 4, Issues 2–4, 2004, Pages 308-311, ISSN 1567-1739, <https://doi.org/10.1016/j.cap.2003.11.035>.

# SUMMARIES OF EMERGING RESIDUAL STRESSES. IDEA AND RESEARCH RELATED TO SPECIFIC BENEFITS IN MECHANICAL ENGINEERING

Nikolay Tontchev, Velichko Machev  
[tontchev@vtu.bg](mailto:tontchev@vtu.bg), [vmachev@vtu.bg](mailto:vmachev@vtu.bg)

*Todor Kableshkov University of Transport,  
158, Geo Milev, str., Sofia  
BULGARIA*

**Key words:** *residual stresses, phase transformations, ion nitriding, Barkhausen noise analysis (BNA).*

**Abstract:** *The study substantiates the feasibility of Barkhausen Noise (BHN) analysis as a suitable technique and tool used as an evaluation of the properties of iron-based materials. Evidence is found that layer depth, with different structures, causes residual stresses of different value. The studies cited in this study have been validated by classical methods, which gives reason to consider that the proposed approach can actually be applied as a reliable means of guaranteeing the desired accuracy.*