

Nanostrukturierte metallische Multilayer zur signifikanten Steigerung der Ermüdungsfestigkeit – eine neue Schweißnahtnachbehandlung

Jakob Brunow¹, Niclas Spalek², Fawad Mohammadi³, Marcus Rutner²

¹WKC Hamburg GmbH, Veritaskai 8, 21079 Hamburg

²Institut für Metall- und Verbundbau, Technische Universität Hamburg, Denickestr. 17, 21075 Hamburg

³Jörss-Blunck-Ordemann GmbH, Kaiser-Wilhelm-Str. 50, 20355 Hamburg

Zusammenfassung: Die Schweißnahtnachbehandlung einer Stumpfnah mit nanostrukturierten metallischen Multilayern (NMM) erreicht einen Kerbfall 190 mit einer Steigung 6, damit eine Vervielfachung der ursprünglichen Lebensdauer. NMM ist eine Cu/Ni-Beschichtung, die durch Elektrodeposition lokal auf Schweißnaht und Schweißnahtübergang aufgebracht wird. Überlegungen zu den Wirkmechanismen werden diskutiert.

1 Einführung

Nanostrukturierte Querschnitte zeichnen sich durch Materialeigenschaften aus, die um ein Vielfaches besser sind als die Materialeigenschaften des homogenen Metallquerschnitts. So weist die Festigkeit des Nanolaminats eine mehrfache Steigerung der Festigkeit gegenüber dem Baustahl S355 auf, wie in Abbildung 1 gezeigt (Mastorakos et al., 2011; Hradil und Talja, 2016; Brunow und Rutner, 2020; Zheng et al., 2013; Wang et al., 2006).

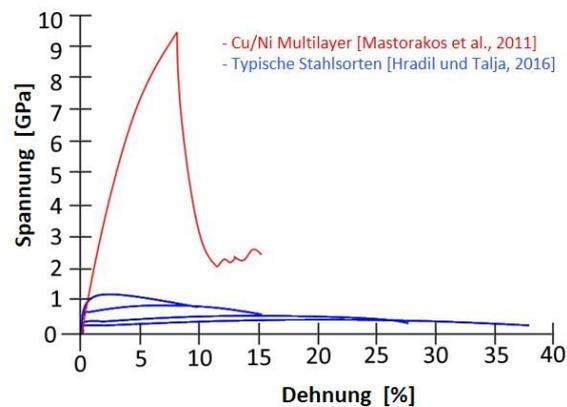


Abbildung 1: Festigkeitssteigerung durch das Nanolaminat.

Die Idee ist, nanostrukturierte Teilquerschnitte genau da im Gesamtquerschnitt zu platzieren, wo der Stahlquerschnitt besonders empfindlich ist. Die geschweißte Verbindung ist bereits nach vergleichsweise kurzer Lebensdauer bei zyklischer Beanspruchung anfällig für Rissinitiierung und zeigt oftmals vorzeitiges Versagen. Dieses Ermüdungsproblem besteht industrieübergreifend und ist Ursache einer Infrastrukturkrise.

Der hier vorgestellte Forschungsansatz verfolgt das Ziel, die Lebensdauer der Infrastruktur durch *materialinherente* Eigenschaften zu gewährleisten, die, wenn implementiert, auch Wartungs- und Reparaturkosten reduzieren sowie Maßnahmen des Structural Health Monitoring (Oppermann et al. 2021; Donskoy et al., 2019; Dorendorf et al., 2022; Conticchio et al., 2015; Bazrafkan and Rutner, 2023) reduzieren könnten. Im Gegensatz zu makrostrukturierten Kompositquerschnitten, z.B. Fiber-Metall-Laminaten (Woelke et al., 2015), haben nanostrukturierte metallische Beschichtungen den Vorteil, nur eine sehr kleine Dicke zu haben und dadurch die Steifigkeit des zu verstärkenden Querschnitts nicht zu verändern. Somit werden keine Steifigkeitssprünge am Übergang von verstärktem zu nicht verstärktem Querschnitt verursacht, die durch Kerbbildung ein neues Ermüdungsproblem darstellen.

Am Institut für Metall- und Verbund der TUHH wurde die metallische Nanolaminatbehandlung (das Nanopflaster) als neues Schweißnahtnachbehandlungsverfahren an 8mm-dicken mit DV-Naht geschweißten Flachproben entwickelt (Brunow und Rutner, 2021). Die Nanolaminatbehandlung ist schematisch und im Querschnitt in einer Rasterelektronen-Mikroskopaufnahme in Abbildung 2 dargestellt.

Die Nanolaminatbeschichtung besteht aus alternierenden Kupfer- und Nickelschichten. Eine Ni-Ausgleichsschicht schafft die Verbindung zwischen Stahlsubstrat und Nanolaminatbeschichtung.

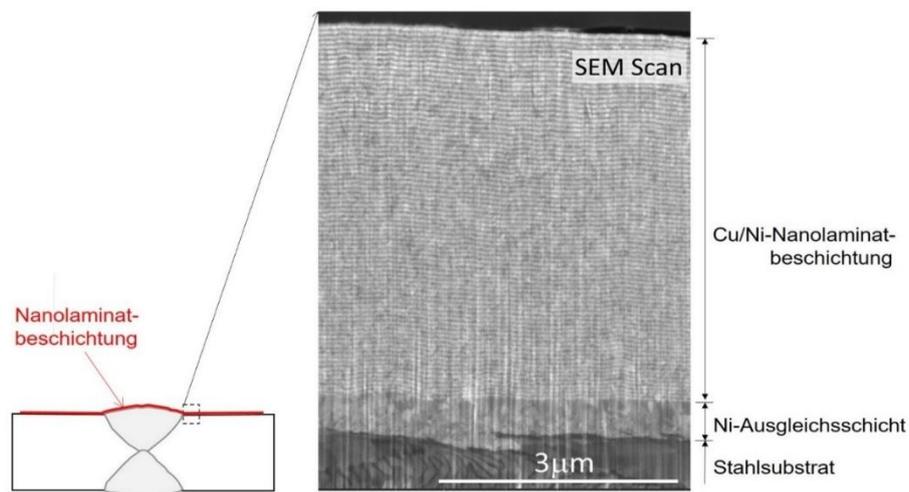


Abbildung 2: Schweißnahtnachbehandlung mit Nanolaminatbeschichtung. Links: Schematische Darstellung und Applikationsbereich; Rechts: REM-Aufnahme des Querschnitts mit Darstellung des Stahlsubstrats, der Ni-Ausgleichsschicht und der aufgetragenen Cu/Ni-Nanolaminatbeschichtung.

2 Nanolaminare Querschnitte

2.1 Skalierbarkeit und Herstellung

In einem DAST-Paper wurde das Potenzial von nanolaminaren Querschnitten für den Konstruktiven Ingenieurbau vorgestellt (Brunow und Rutner, 2020). Die Evaluierung verschiedener Verfahren zur Herstellung von Nanolaminat, u.a. die Physikalische Gasphasenabscheidung (Ramezani et al., 2017), zeigte Grenzen hinsichtlich der Skalierbarkeit und Übertragbarkeit auf den Konstruktiven Ingenieurbau auf. Die galvanische Metallabscheidung im Single-Bath-Verfahren erwies sich letzten Endes als skalierbar und vielversprechend, die Herstellung von Nanolaminat beliebiger Gesamtdicken zu ermöglichen (Kanani, 2020).

2.2 Versuchskörper und Versuchsdurchführung

In einer Vorstudie wurde eine dünne Nanolaminatbeschichtung auf die DV-Naht einer 8 mm-dicken Flachprobe (S355 J2) der Geometrie gemäß Typ E aus DIN 50125 (Dogbone) aufgebracht.

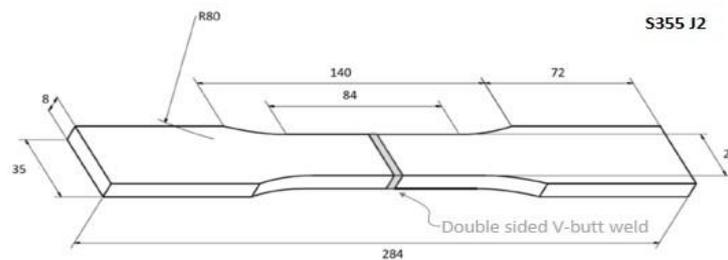


Abbildung 3: S355 J2 - Flachprobe (Dogbone) Probengeometrie Typ E nach DIN 50125 mit zentrischer DV-Naht

Die Flachprobe hat die Länge/Breite/Dicke von 284 mm/25 mm/8 mm und ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Nanolaminatbehandlung besteht aus 80 Doppelschichten alternierender 15 nm-Cu- und 35 nm-Ni-Schichten, wie in Abbildung 2 gezeigt. Die nanolaminierten Proben wurden zusammen mit unbehandelten Proben, polierten Proben und mit Hochfrequenzhämmern (HIFIT) nachbehandelten Proben im Ermüdungsversuch getestet. Die Vorstudie umfasste 32 unbehandelte Proben (davon 3 Durchläufer), 11 polierte Proben (davon 4 Durchläufer), 20 hochfrequenzbehandelte Proben (davon 2 Durchläufer) und 16 nanolaminierte Proben (davon 4 Durchläufer).

Aus den Ergebnissen der Ermüdungsversuche wurde mit dem Perlenschnurverfahren nach DIN 50100 die Wöhlerlinie erzeugt.

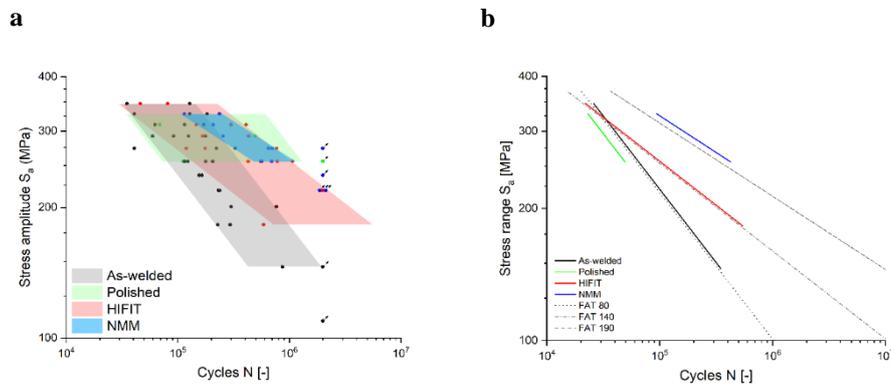


Abbildung 4: (a) 80%-Konfidenzintervalle der unbehandelten, polierten, mit Hochfrequenzhämmern (HIFIT) nachbehandelten und mit Nanolaminat behandelten Proben; Ermüdungsversuche im Zugschwellbereich ($R=0$); (b) 5%-Quantile der Wöhlerkurven als Grundlage für die Auslegung von Bauwerken nach EN 1993-1-9 (Brunow et al., 2023)

Abbildung 4a zeigt alle Datenpunkte der Versuchsserie. Das Wöhlerdiagramm in Abbildung 4a schafft interessante Einblicke: Die über die Datenpunkte gezeichneten Konfidenzintervalle spannen zwischen der 10%- und 90%-Zeitfestigkeitsgerade. Die Breite dieser Konfidenzintervalle visualisiert damit die Streuung der Daten. Verglichen mit den nanolaminierten Proben streuen die Ergebnisse der unbehandelten, der polierten und der mit Hochfrequenzhämmern (HIFIT) nachbehandelten Proben deutlich stärker (Abbildung 4a). Es sind weitere Versuchsserien nötig, um die beobachteten Effekte statistisch zu erweitern, jedoch zeigt sich bereits die hohe Wirksamkeit der Nanolaminatbeschichtung durch die geringe Breite des Konfidenzintervalls und eine ermittelte Neigung der Wöhlerlinie von $m=6,79$.

Abbildung 4b zeigt die nach EN 1993-1-9 für die Bemessung relevanten 5%-Quantile der getesteten Proben. Eine große Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit der nanolaminierten Proben gegenüber den unbehandelten Referenzproben (as-welded), den polierten sowie den mit Hochfrequenzhämmern (HIFIT) nachbehandelten Proben ist zu erkennen. Die 5%-Zeitfestigkeitsgerade der nanolaminierten Proben liegt oberhalb der Kerbfallklasse 190, während die unbehandelten Proben erwartungsgemäß Kerbfallklasse 80 erreichen. Die mit Hochfrequenzhämmern (HIFIT) nachbehandelten Proben liegen erwartungsgemäß bei Kerbfallklasse 140 (Yildirim und Marquis, 2011). Die polierten Proben liegen durch eine größere Streuung sogar noch unterhalb Kerbfallklasse 80. Aus den Vorversuchen ist weiter erkennbar, dass die Neigung der Wöhlerlinie der mit Nanolaminat behandelten Proben deutlich kleiner ist als bei der unbehandelten, bzw. der polierten Probe. Bei einer Spannungsschwingbreite von 65% der Fließgrenze stellen sich bereits Durchläufer ein.

2.3 Wirkmechanismen der Nanolaminatbehandlung

Brunow et al. (2022) zeigen auf, dass infolge Nanolaminatbehandlung verschiedene Wirkmechanismen zur gesteigerten Ermüdungsresistenz beitragen. Dabei ist zwischen Wirkmechanismen zur Verzögerung der Rissinitiierung und Wirkmechanismen zur Verzögerung des Rissfortschritts zu unterscheiden, wie in Abbildung 5 gezeigt.

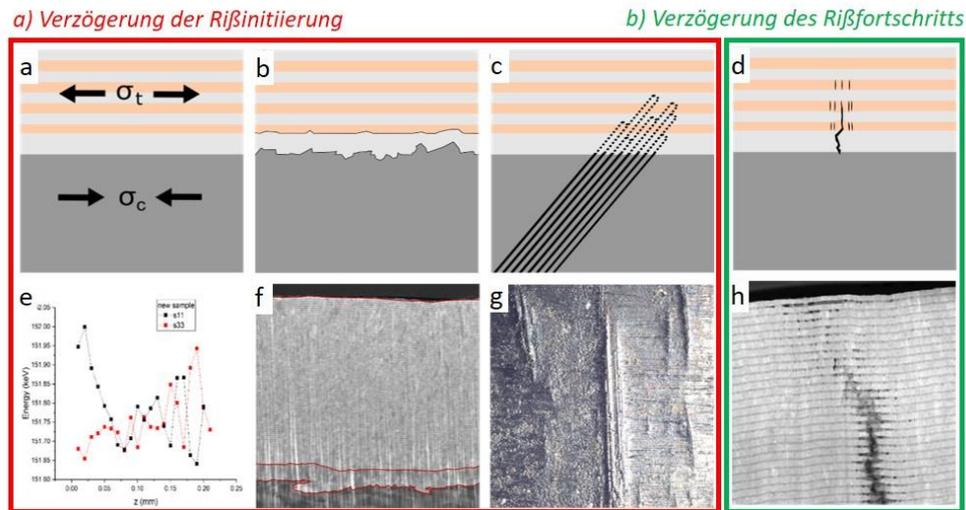


Abbildung 5: a) Wirkmechanismen der Verzögerung der Rissinitiierung und b) Wirkmechanismen der Verzögerung des Rissfortschritts (Brunow et al., 2023)

Messergebnisse der Eigenspannungen an der Beamline P61A bei PETRA-III am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg zeigen Zugeigenspannungen in den Nickelschichten in der Größenordnung von einigen 100 MPa der noch unbelasteten Probe. Entsprechend werden im Stahlsubstrat oberflächennah erhebliche Druckeigenspannungen erkannt, die sich, wie in Abbildung 5a und e zu sehen, über die Querschnittshöhe des Probekörpers abbauen.

Durch die Nanolaminatbeschichtung wird die Rauigkeit extrem reduziert, wie in Abbildung 5b und f gezeigt. Darüber hinaus wirkt das Nanolaminat wie ein Korsett. Die Kombination aus Härte und extrem hoher Festigkeit von einigen GPa des Nanolaminats infolge des Hall-Pech-Effekts verhindert Extrusions- und Intrusionsbildung, die Vorläufer der Rissinitiierung (Abbildung 5c und g).

Abbildung 5d und h zeigt die Wirkmechanismen der Verzögerung des Rissfortschritts. Der TEM-Scan zeigt den Rissfortschritt im Cu/Ni-Nanolaminat mit einer partiell intakten nanolaminaren Struktur vor der Risspitze. Aus diesem Bereich des Nanolaminats vor der Risspitze lassen sich eine multiple Rissbildung in den Kupferschichten und eine Rissüberbrückung (crack bridging) der Nickelschichten erkennen. Ein komplexes Risswachstum mit Phasen der Rissablenkung, -reinitiierung und -stop ist zu beobachten.

3 Zusammenfassung

Stahlkonstruktionen, die zyklischen Belastungen ausgesetzt sind, altern durch Materialermüdung vorzeitig. Die Materialermüdung spielt sich lokal, vor allem in den Verbindungen, ab. Der Fokus in dieser Studie liegt auf der geschweißten Verbindung mit DV-Naht. Nanolaminare metallische Multilayer (NMM), die lokal auf Schweißnaht und Schweißnahtübergang durch galvanische Metallabscheidung aufgetragen werden, zeigen Potenzial als Schweißnahtnachbehandlungsverfahren zur Erreichung einer deutlich gesteigerten Ermüdungsfestigkeit. Die durch NMM nachbehandelte DV-Naht erreicht Kerbklasse 190. Die Studie umfasst auch eine Vergleichsstudie mit HFMI nachbehandelten Proben.

Literatur

- [1] MASTORAKOS, I.N.; BELLOU, A.; BAHR, D.F.; ZBIB, H.M. Size-dependent strength in nanolaminate metallic systems. *Journal of Materials Research*, 26 (2011), S. 1179–1187
- [2] HRADIL, P.; TALJA, A. Ductility limits of high strength steels, VTT Research Report, VTT-R-04741-16, 2016 (6)
- [3] OPPERMAN, P.; DORENDORF, L.; RUTNER, M.; RENNER, C. Nonlinear Modulation with Low-Power Sensor Networks using Undersampling, *Structural Health Monitoring*, Sage Publishing, 20 (6), 2020, S. 3252-3264
- [4] DONSKOY, D.; GOLCHINFAR, B.; RAMEZANI, M.; RUTNER, M.; HASSIOTIS, S. Vibro-acoustic amplitude and frequency modulations during fatigue damage evolution, AIP Conference Proceedings 2102 (1) 2019
- [5] DORENDORF, L.; LALKOVSKI, N.; RUTNER, M. Physical explanation for vibro-acoustic modulation due to local and global nonlinearities in a structure and its experimental and numerical validation. *Journal of Sound and Vibration*, 528 (2022), 116885
- [6] CONTICCHIO, M.; GOMBAR, J.; JANDRESKI, D.; MURPHY, J.; STECYK, C.; TESSITORE, L.; BRUNELL, L.; FISHER, F.; MCNAIR, B.; RUTNER, M. Vibrational energy harvesting for structural health instrumentation, US Patent App. 14/712,042, 2015
- [7] BAZRAFKAN, M.; RUTNER, M. Defect Localization in Metal Plates Using Vibroacoustic Modulation, *NDT*, 1 (2023), S. 3-21
- [8] WOELKE, P.; RUTNER, M.; SHIELDS, M.D.; RANS, C.D.; ALDERLIESTEN, R.C. Finite element modeling of fatigue in Fiber-Metal Laminates, *AIAA Journal*, 53 (2015)
- [9] BRUNOW, J.; RUTNER, M. Das Nanolaminatpflaster – Schweißnahtnachbehandlung für bisher unerreichte Lebensdauererlängerung, *Stahlbau*, 90 (2021), S. 691-700

- [10] BRUNOW, J.; RUTNER, M. Fügen von nanostrukturierten metallischen Querschnitten – Einsatz als Makroquerschnitt im konstruktiven Ingenieurbau, IN: Tagungsband Deutscher Ausschuss für Stahlbau, DASt-Kolloquium, 31.03.-01.04.2020, Karlsruhe
- [11] ZHENG, S.; BEYERLEIN, I.J.; CARPENTER, J.S.; KANG, K.; WANG, J.W.; HAN, W.; MARA, N.A. *Nat. Commun.* 4 (2013) 1696
- [12] WANG, Y.C.; MISRA, A.; HOAGLAND, R.G. *Scr. Mater.* 54 (2006) 1593–1598
- [13] RAMEZANI, M.; DEMKOWICZ, M.; FENG, G.; RUTNER, M. Joining of physical vapor-deposited metal nano-layered composites, *Scripta Materialia*, 139 (2017), S. 114-118
- [14] KANANI, N., Galvanotechnik, Hanser Verlag, 2020
- [15] DIN 50125 :2022-08, Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben, 2022, Beuth
- [16] DIN 50100: 2016-12, Schwingfestigkeitsversuch - Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile, 2016, Beuth
- [17] BRUNOW, J; SPALEK, N; MOHAMMADI, F.; RUTNER, M. A novel post-weld treatment using nanostructured metallic multilayer for superior fatigue strength, *Scientific Reports*, 13 (2023), 22215
- [18] EN 1993-1-9: 2010-12, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue, 2010, Beuth
- [19] YILDIRIM, H.C.; MARQUIS, G.B., Fatigue strength improvement factors for high strength steel welded joints treated by high frequency mechanical impact, *International Journal of fatigue*, 44 (2012) S. 168-176
- [20] BRUNOW, J.; GRIES, S., KREKELER, T.; RUTNER, M. Material mechanisms of Cu/Ni nanolaminate coatings resulting in lifetime extensions of welded joints, *Scripta Materialia*, 212 (2022), 114501