

Höherfrequentes Hämmern (HFH, HFMI) – Internationaler Stand der Technologie und Anwendung im Schienenfahrzeugbau

Dipl.-Ing. Peter Gerster GEC Ehingen, Frank Schäfers Fa. PITEC GmbH Kerpen

1 Einleitung

Dass man mittels Hämmern Druckeigenspannungen erzeugt, die sich positiv auf die Schwingfestigkeit auswirken ist schon sehr lange bekannt. Jedoch war die Wirkung der hierzu verwendeten, herkömmlichen Luftmeißel oder auch Nadelhammer so ungleichmäßig und oft auch oberflächlich, dass dieses Hämmern wegen der mangelnden Reproduzierbarkeit nie anerkannt wurde.

Erst durch die Entwicklung des höherfrequenten Hämmerns (in Deutschland bekannt unter HFH, international unter HFMI) wurde von der Wissenschaft diese Technologie anerkannt. Am Beispiel des weltweit am verbreitetsten eingesetzten Verfahrens PIT möchte ich den Stand dieser Technologie erläutern.

Der englischsprachige Begriff Pneumatic Impact Treatment (PIT) bezeichnet ein Nachbehandlungsverfahren, wobei durch höherfrequentes Hämmern der Oberfläche eine Steigerung der Ermüdungsfestigkeit erzielt wird. Im Speziellen wird die Methode bei Schweißverbindungen angewendet, wobei eine wesentliche Erhöhung der Lebensdauer erreicht werden kann. Die Wirkungsweise beruht dabei auf einer Reduktion der geometrischen Kerbwirkung am Nahtübergang, einem Aufbau von Druckeigenspannungen und einer Verfestigung des Materials im nachbehandelten Bereich. Durch die einfache Bedienbarkeit und einer hohen Reproduzierbarkeit zeichnet sich das Verfahren insbesondere für industrielle Anwendungen im Anlagen-, Behälter-, Maschinen- oder Stahlbau, Schienenfahrzeugbau, usw. aus. Bild 1 zeigt die erforderliche Ausrüstung (Handgerät mit Steuerggerät).



Bild 1: PIT Ausrüstung

2 Ermüdungsfestigkeit

Unter Materialermüdung wird eine Schädigung oder ein Versagen von Bauteilen und Werkstoffen unter zyklischer Beanspruchung verstanden. Es bilden sich dabei Anrisse bevorzugt an Kerben, Fehlstellen oder hochbeanspruchten Zonen, welche sich fortlaufend vergrößern und

schließlich zum Versagen oder Ausfall der Komponente führen.^[1]

Im Allgemeinen steigt die Ermüdungsfestigkeit mit zunehmender statischer Festigkeit eines Werkstoffs. Im Fall von geometrischen Unregelmäßigkeiten wie Kerben, welche konstruktionsbedingt oder durch Schweißverbindungen entstehen können, ist dieser Zusammenhang durch die zunehmende Kerbempfindlichkeit hochfester Materialien, nur bedingt erfüllt.

Aus diesem Grund ist das Ermüdungsverhalten geschweißter Stahlverbindungen nach aktuellen Richtlinien^[2] und Empfehlungen^{[3][4]} generell unabhängig von der Streckgrenze des verwendeten Grundmaterials. Bedingt durch die ständig wachsenden Forderungen nach einer erhöhten Leichtbauweise und einer Steigerung der Lebensdauer von Komponenten und Strukturen, ist jedoch eine Verbesserung des Ermüdungsverhaltens unerlässlich. Dies kann beispielsweise durch den Einsatz einer PIT-Nachbehandlung bei höher- und hochfesten, aber auch niederfesten Grundmaterialien erzielt werden.

3 Verfahrensbeschreibung

Das PIT-Verfahren ist ein pneumatisch betriebenes, höherfrequentes Hämmerverfahren, welches zur mechanischen Nachbehandlung von geschweißten Verbindungen und hochbeanspruchten ungeschweißten Zonen eines Bauteils entwickelt wurde. Sowohl die Bearbeitungsfrequenz, als auch die Schlagintensität sind unabhängig voneinander einstellbar, wodurch es möglich ist den unterschiedlichen Anforderungen verschiedener Werkstoffe und Schweißnahtgeometrien gerecht zu werden. Ein pneumatischer Muskel im Gerät wandelt die Druckenergie in mechanische Impulse um, welche durch einen oder mehreren gehärteten Stahlbolzen auf die zu behandelnde Oberfläche übertragen werden.

Um die Vibrationen während der Behandlung möglichst gering zu halten, ist ein weiteres Federsystem inkludiert, so dass das Handgerät von der Schlagkraft vollständig entkoppelt ist. Dies bewirkt eine geringe Handarmvibration in der Höhe von rund 5 m/sek² für den Bediener und zusätzlich ergibt sich eine nahezu konstante Schlagkraft, wodurch eine hohe Reproduzierbarkeit gewährleistet ist.

Die Vorschubgeschwindigkeit bei Stahl beträgt etwa 20 cm/min bei einer frei wählbaren Bearbeitungsfrequenz des oder der Stahlbolzen von bis zu 80-120 Hz. Über die Druckluft lässt sich die Schlagintensität stufenlos einstellen, wobei im Gegensatz zu anderen Verfahren das Gerät bereits bei einem Druck von unter 4 bis 5 bar funktionstüchtig ist und somit einen geringen Luftverbrauch von etwa 175 bis 250 l/min aufweist. Das Abführen der Abluft nach vorne zur Bearbeitungsstelle hat den Vorteil, dass Lackpartikel, Metallspäne und sonstige Verunreinigungen weggeblasen und nicht ungewollt in die Werkstückoberfläche eingedrückt werden, und die strömende Luft den oder die Bolzen kühlt und dadurch die Standzeit deutlich erhöht wird.^[5]

4 Wirkungsweise der PIT Technologie

Gegenüber anderen Nachbehandlungsverfahren, wie zum Beispiel Schleifen, Kugelstrahlen oder Spannungsarmglühen, wobei eine Steigerung der Ermüdungsfestigkeit bzw. Lebensdauer meist nur durch einen Effekt erzielt wird, kommen beim PIT-Verfahren folgende Wirkungsweisen kombiniert zur Geltung:

- Reduktion der geometrischen Kerbwirkung

Durch die Nachbehandlung wird der für die Ermüdungsbeanspruchung kritische Übergang vom Grundmaterial zur Schweißnaht ausgerundet (siehe Bilder 2 und 3), wodurch dies zu einer wesentlichen Reduzierung der geometrischen Kerbwirkung in diesem Bereich führt. Speziell bei kerbscharfen Geometrien, wie zum Beispiel Schweißnahtenden, trägt dieser Effekt wesentlich zur Wirkungsweise bei.

- Verfestigung des Materials

Bedingt durch die Umformung des Materials findet im nachbehandelten Bereich eine lokale Verfestigung statt. Je nach Werkstoff und Verfestigungsverhalten kann dies zu einer wesentlichen Erhöhung der Härte und somit auch zu einer Festigkeitssteigerung führen.

- Aufbau von Druckeigenstressungen

Zusätzlich zur lokalen Verfestigung werden Druckeigenstressungen eingebracht, welche entgegen den ermüdungsrelevanten Zugspannungen wirken und dadurch die gesamte Beanspruchung in der höchstbelasteten Zone senken. Zur Verifikation des sich ausbildenden Eigenspannungszustandes durch die Nachbehandlung können Messungen der Eigenspannungen mittels Röntgendiffraktometrie oder Bohrlochmethode dienen, aber auch eine Abschätzung des lokalen Eigenspannungszustandes basierend auf einer numerischen Simulation ist möglich.

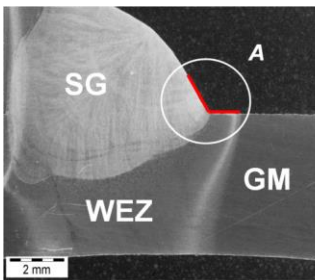


Bild 2: Makroschliff A

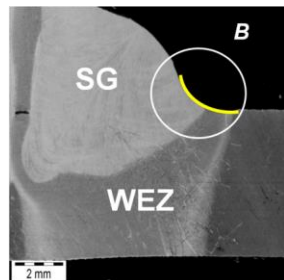


Bild 3: Makroschliff B

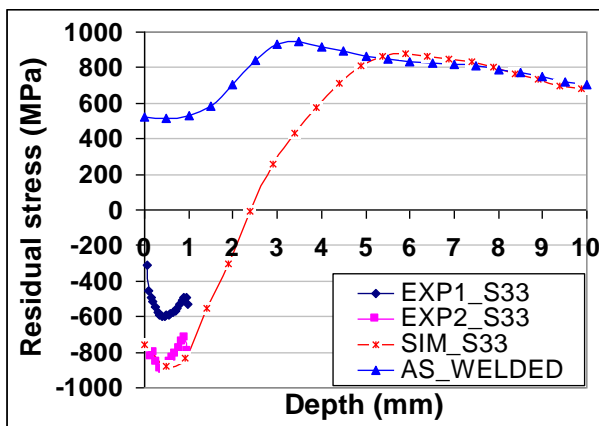


Bild 4: Eigenspannungen längs zur Schweißnaht

Im Bild 6 sind die vorhandenen hohen Zugeigenstressungen (blaue Kurve) nach dem Schweißen dargestellt. Die Werte liegen im Bereich der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes. Die Simulation des Eigenspannungverlaufes nach der PIT-Behandlung (rote Kurve) zeigt, dass durch diese Behandlung Druckeigenstressungen ebenfalls in der Höhe der Festigkeit des Grundwerkstoffes im oberflächennahen Bereich eingebracht werden. Deutlich ist auch die Tiefenwirkung der Druckeigenstressungen (bis ca. 2,3 mm) zu erkennen. Auch die Messergebnisse der Druckeigenstressungen mit der klassischen Bohrlochmethode (bis ca. 1 mm Tiefe) stimmen speziell bei dem Experiment 2 sehr gut mit der Simulation überein.

Im Bild 5 sieht man sehr schön die Verteilung der Eigenspannungen nach dem Schweißen und ohne PIT-Behandlung.

Bild 6 zeigt das Eigenspannungsniveau nach der PIT-Behandlung. Deutlich sind die sehr hohen Druckeigenstressungen bis mit blauer Farbe über 800 MPa zu sehen.

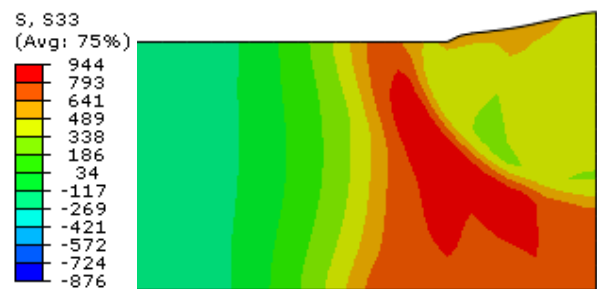


Bild 5: Zugeigenstressungen ohne PIT

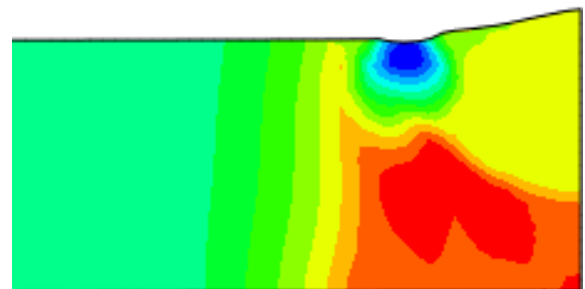


Bild 6: Druckeigenstressungen durch PIT

Das Ergebnis dieser verschiedenen Faktoren spiegelt sich sehr deutlich in dem Wöhler-Schaubild Bild 7 wieder.

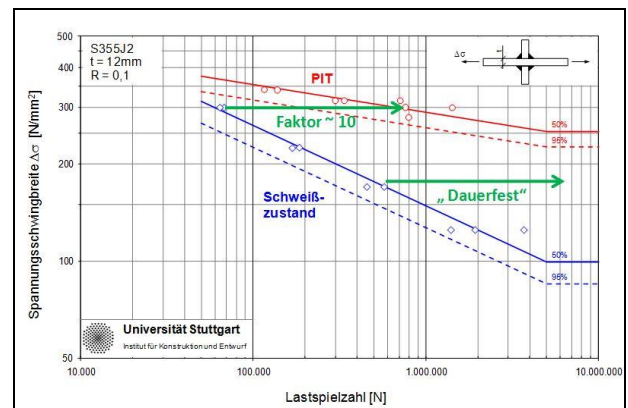


Bild 7: Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit S355

5 Forschungsergebnisse

Im Rahmen des International Institute of Welding (IIW) wurde der Effekt von Schweißnahtnachbehandlungen auf die Ermüdungsfestigkeit bereits umfassend untersucht, woraus auch internationale Empfehlungen^[2] und Anwendungsrichtlinien^[3] entstanden sind. Das höherfrequente Hämmern wurde hierbei unter dem englischen Begriff High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment eingeführt und basierend auf aktuellen Forschungsergebnissen wurden Vorschläge für eine von der Grundmaterialfestigkeit abhängige Steigerung der Ermüdungsfestigkeit ausgearbeitet, welche derzeit in die Richtlinien eingefügt werden.^{[6][7][8]}

Bild 8 zeigt in einem Auszug aus dem IIW Dokument XIII-2452r1-13 von Marquis et al. pdf 2 Tabellen über vorgeschlagene Erhöhungsfaktoren. Hier sieht man deutlich die wesentlich höheren Faktoren gegenüber dem konventionellen Hämmern.

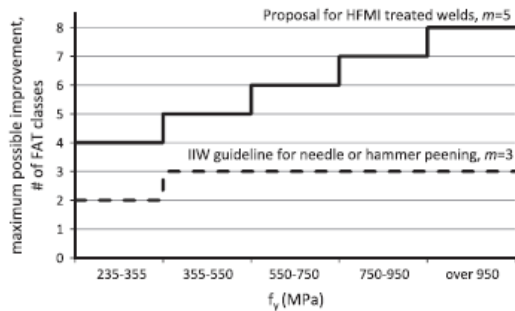


Fig. 5. Proposed maximum increase in the number of FAT classes as a function of f_y .

Table 6

Existing IIW FAT classes for as-welded and hammer or needle peened welded joints and the proposed FAT classes for HFMI treated joints as a function of f_y .

f_y (MPa)	Longitudinal welds	Transverse welds	Butt welds
All f_y	As-welded, $m = 3$ [2]	80	90
	Improved by hammer or needle peening, $m = 3$ [1]	100	112
$f_y \leq 355$	90	100	112
$355 < f_y$	100	112	125
Improved by HFMI, $m = 5$	$235 < f_y \leq 355$	112	140 ^a
	$355 < f_y \leq 550$	125	160
	$550 < f_y \leq 750$	140	180
	$750 < f_y \leq 950$	160	180 ^a
	$950 < f_y$	180	-

^a no data available.

Bild 8: Auszug aus IIW Dokument XIII-2452r1-13

Zahlreiche Untersuchungsergebnisse^{[9][10][11]} für geschweißte Stahlverbindungen mit einer Streckgrenze von 235 bis 1300 MPa zeigen beispielhaft, dass durch eine PIT-Nachbehandlung eine wesentliche Steigerung der Ermüdungsfestigkeit von bis zu 250 % im Bereich der Langzeitfestigkeit (ab rund einer Millionen Lastzyklen) erreicht werden kann. Durch vergleichende Versuche an Grundmaterialproben wird außerdem verdeutlicht, dass bei einer Anwendung des Verfahrens die Ermüdungsfestigkeit des Grundmaterials nahezu zur Gänze ausgenutzt werden kann, womit ein hohes Leichtbaupotenzial für geschweißte Strukturen gegeben ist. Des Weiteren wird gezeigt, dass diese Nachbehandlungstechnik eine effektive Möglichkeit zur Ertüchtigung bereits bestehender Strukturen darstellt.^[12]

6 Qualitätssicherung

Zur industriellen Anwendung ist eine hohe Reproduzierbarkeit und qualitätssichernde Maßnahmen ein wesentlicher Aspekt. Neben einer fachlich fundierten Einschulung und Sensibilisierung des Bedieners kann die Qualität

einerseits durch optische Kontrollen der Behandlungsspur nach der Anwendung, sowie durch eine Prüfung der Intensität der Behandlung mit Hilfe des PIT-ALMEN Intensitätstests vor der Nachbehandlung erfolgen. Durch diese Maßnahmen wird eine gleichbleibende Qualität und Wirkung des PIT-Verfahrens nachhaltig gewährleistet.^[13]

7 Vorteile durch PIT

Der wesentliche Vorteil durch die PIT-Behandlung besteht in einer Steigerung der Ermüdungsfestigkeit und in weiterer Folge der Lebensdauer geschweißter Verbindungen und hochbeanspruchter Komponenten. Durch das Verfahren kann einerseits die Festigkeit nieder-, höher- und hochfester Grundmaterialien nahezu zur Gänze ausgenutzt werden, wodurch ein erhebliches Leichtbaupotential und eine Einsparung von Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemission entsteht, aber auch eine Ertüchtigung von Bauteilen im Betrieb ist wirkungsvoll möglich.

Die kompakte und äußerst transportable PIT-Anlage ermöglicht auch eine problemlose Behandlung von Schweißnähten auf Baustellen. Durch den speziellen mechanischen Aufbau ist es möglich die Anlage in einen automatisierten Herstellprozess zu integrieren, zum Beispiel als Aufbau an einem Roboter, welcher bei großen Stückzahlen und langen Schweißnähten effizient einsetzbar ist.

Generell bietet das PIT-Verfahren folgende Vorteile, welche durch zahlreiche Untersuchungen in Wissenschaft und Industrie bestätigt wurden:^{[14][15][16]}

- Erhöhung der Lebensdauer
- Steigerung des Leichtbaupotentials
- Verminderung und Kontrolle des Schweißverzugs
- Ertüchtigung vorgeschädigter Schweißverbindungen
- Erhöhung der Oberflächenhärte
- Verbesserung des Spannungsrissskorrosionswiderstands

Bereits seit 2 Jahren laufen an der Universität in Stuttgart und am KIT der Universität in Karlsruhe umfangreiche Untersuchungen, mit dem Ziel eine DASt-Richtlinie für das höherfrequente Hämmern zu erstellen.

Das PIT-Verfahren wird bereits vielfach im industriellen Sektor eingesetzt^{[17][18][19]}, wobei nachfolgend ausgewählte Anwendungsbeispiele im Schienenfahrzeugbau vorgestellt werden.

8 Anwendungen in der Schienenfahrzeugindustrie

Die Firma Bombardier hat bereits relativ früh an einem Kreuzstoß (mit Kehlnähten) zyklisch schwingende Biegebelastungen durchgeführt. Dieser Schweißstoß wird gemäß dem Eurocode 3 1.9 in eine FAT-Klasse 80 eingestuft. Die Ergebnisse der nachbehandelten Proben lagen deutlich über der Linie der FAT-Klasse 160, die eigentlich dem Grundwerkstoff entspricht. Aufgrund der durchgeführten Versuche kann man hier mit einem Erhöhungsfaktor von 2 auf die in den Festigkeitsnachweisen angewendeten Spannungen rechnen. Aus diesem Grund hat Bombardier bereits die Werke Netphen, Bautzen und Görlitz mit PIT Geräten ausgerüstet.

Auch die Firma Siemens in Graz hat sich nach umfangreichen Untersuchungen im Rahmen eines Forschungsvorhabens an der Montanuniversität Leoben entschlossen diese Technologie besonders bei kritischen Drehgestellen einzusetzen und deshalb eine PIT-Ausrüstung gekauft.

9 Einsatz von PIT bei der Sanierung

Bei den hochbelasteten Waggonen für den Transport von kompletten Lastkraftwagen („Rola“) sind im Laufe des Fahrbetriebes bei einem europäischen Betreiber u. a. an mehreren Fahrwerksrahmen Ermüdungsrisse entstanden. Bei der Überlegung, ob und wie diese Rahmen saniert werden können, hat ein Gutachter des Eisenbahnamtes, der die PIT-Technologie kannte, empfohlen bei der Reparatur diese Technologie einzusetzen. Darauf wurden vom Waggonhersteller, der die Sanierung durchführen sollte, erst einmal Vorversuche an der Universität in Stuttgart durchgeführt. Über die Ergebnisse dieser Untersuchungen habe ich bereits 2011 auf der gleichen Tagung berichtet. Aufgrund der guten Ergebnisse wurden dann weitere Versuche an Original-Fahrwerksrahmen durchgeführt. Die Risse wurden sachgemäß ausgefugt und nach Schweißanweisung geschweißt (Bild 9). Um die Zugeigenspannungen relativ niedrig zu halten, wurde jede Lage PIT behandelt. Bild 11 zeigt die einzelne Lage nach der PIT Behandlung.



Bild 9: Reparaturschweißen gemäß Schweißanweisung

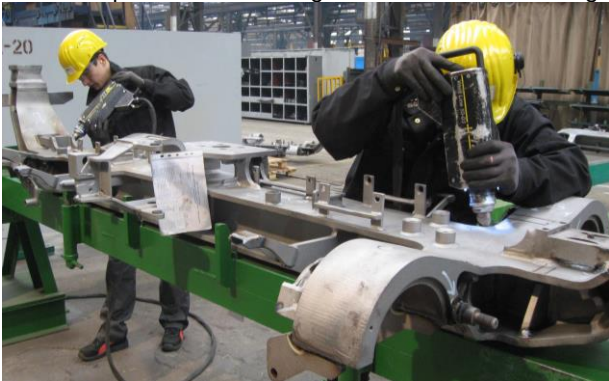


Bild 10: PIT Behandlung der Zwischenlagen



Bild 11: PIT behandelte Zwischenlage

Bei den Reparaturenähten wurde nach deren Fertigstellung zur weiteren Reduzierung der Zugeigenspannungen auch noch die Nahtoberfläche komplett PIT behandelt. Der so reparierte Fahrwerksrahmen wurde anschließend zusammengebaut und auf einem Schwingungsprüfstand bei der Firma Skoda in Pilsen unter praxisnaher Belastung getestet (Bild 12).

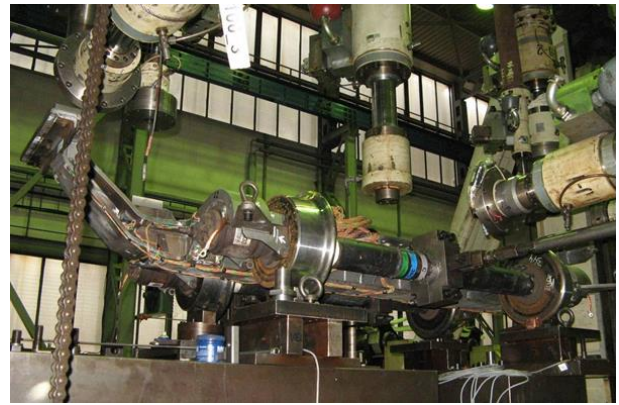


Bild 12: komplettes Aggregat auf Schwingungsprüfstand

Bei 3,2 Mio. Lastwechseln trat an einer nicht reparierten Schweißnaht einer Versteifungsrippe ein Riss auf, der dann auf dem Prüfstand ohne PIT Behandlung repariert wurde. Bereits nach weiteren 100.000 LW ist diese Stelle wieder gerissen. Diesmal wurde bei der Reparaturschweißung wieder jede Lage PIT behandelt, danach trat an dieser Stelle kein Riss mehr auf. Bei 8,4 Mio. LW ist dann auf der gegenüberliegenden Seite ebenfalls ein Riss an einer Versteifungsrippe aufgetreten. Diesmal wurde bei der Reparatur gleich PIT behandelt und weitergetestet. Nach 12 Mio. Lastwechseln wurde der Versuch beendet.

Es zeigte sich bei dem Versuch, dass keine der reparierten und PIT behandelte Schweißnähte während der ganzen Laufzeit gerissen sind. Bei dem Versuch wurden weitere Schwachstellen an Versteifungsrippen erkannt, die bisher im Fahrbetrieb noch nicht aufgetreten sind.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden und werden alle Fahrwerksrahmen zusätzlich zur Sanierung der Risse die kritischen Stellen wie Versteifungsrippen und Anbauteile präventiv PIT behandelt.



Bild 13: präventive PIT Behandlung

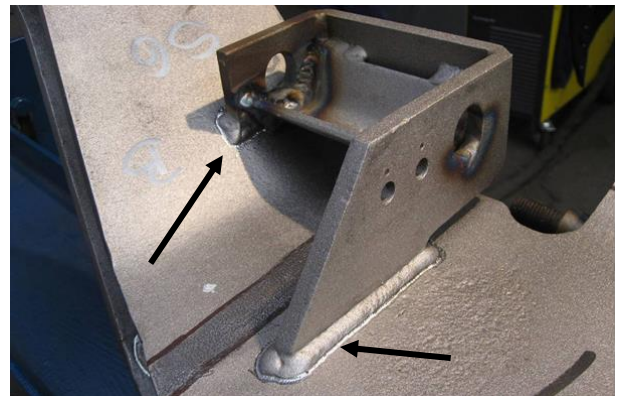


Bild 14: präv. PIT Behandlung des Nahtüberganges

Bild 13 zeigt die präventive PIT-Behandlung der Anbauteile, während im Bild 14 sehr schön die Behandlungsspuren der kritischen Schweißnahtübergänge zu erkennen sind.

Auch die Firma Gleisbaumechanik in Brandenburg war relativ schnell von der positiven Wirksamkeit der PIT-Technologie überzeugt und kaufte ebenfalls eine PIT-Ausrüstung. GBM sichert sich dadurch die Nachhaltigkeit der Schweißverbindungen, sowohl im Reparaturbereich, als auch bei Umbauten und Modernisierungen.



Bild 15: PIT Behandlung kritischer Anbauteile (GBM)

Die Firma IFTEC in Leipzig als kompetenter Partner für die Instandhaltung von Schienenverkehrssystemen nutzt die Dienstleistung der Firma Pitec. Speziell für die Reparatur von Ermüdungsrissen bei Drehgestellen für Straßenbahnen holt IFTEC die Spezialisten von Pitec. Durch die PIT-Behandlung der Reparaturnähte verspricht sich die Firma eine deutliche Verbesserung der Lebensdauer.

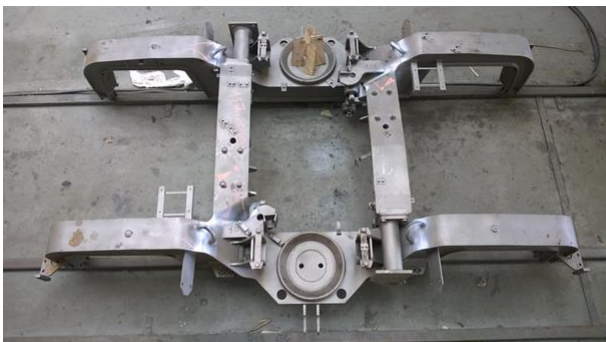


Bild 16: Drehgestell einer Straßenbahn (IFTEC)

Die Schweizerische Bundesbahn hat erkannt, dass die PIT-Technologie sowohl korrektiv, als auch präventiv bei der Instandhaltung Ihrer Waggons eingesetzt werden kann. So nutzt die SBB Cargo die Erhöhung der Verfügbarkeit Ihres Fuhrparks bei der Sanierung von Ermüdungsschäden, indem Sie die „Hot spots“ falls diese noch nicht gerissen sind, präventiv PIT behandelt (Bild 16). Die SBB hat für Ihre Instandsetzungswerke bereits 2 Anlagen von Pitec gekauft.



Bild 16: PIT-Behandlung Untergurt SBB Cargo

Neuester Kunde sind die Berliner Verkehrsbetriebe BVG die ebenfalls auf die Nachhaltigkeit bei der Sanierung Ihres Fahrzeugparkes durch das höherfrequente Hämmern setzen.



Bild 17: Instandsetzungshalle bei der BVG

10 Zusammenfassung und Zukunftsaussichten

Die Ausführungen haben gezeigt, dass mit dieser Technologie es möglich ist, die Lebensdauer von zyklisch schwingend beanspruchten Schweißkonstruktionen wesentlich zu erhöhen. Ergebnisse aus verschiedenen Forschungsberichten zeigen, dass bei einer Lastwechselzahl von 2×10^6 Millionen die Ermüdungsfestigkeit verdoppelt werden kann. Da nach der heute noch gültigen Normung die Betriebsfestigkeit unabhängig von der Festigkeit des Materials ist, war man bisher mit dem Einsatz der härtesten Feinkornstähle im gesetzlich geregelten Bereich noch sehr zurückhaltend. Schon bei dem Forschungsvorhaben P620 hat die Universität Stuttgart festgestellt, dass je höher die Streckgrenze des Werkstoffs, desto größer auch der Effekt der Schweißnahtnachbehandlung ist, da auch höhere Druckeigenstressungen initiiert werden können. Dies bestätigen nun auch wieder die Versuche der Montanuniversität Leoben an dem Stahl S960. So ist es zukünftig auch möglich, effizientere Stahlbauten mit Hilfe dieser Technologie herzustellen. Deshalb wird auch von den versch. Forschungsstellen angestrebt, diese guten Ergebnisse in die zukünftige Normung einfließen zu lassen.

International findet nun das Höherfrequente Hämmern immer mehr Beachtung und Anwendung. Das IIV beschäftigt in der Working-Group WG 2 Kommission XIII (Betriebsfestigkeit) mit dem Thema HFMI. Hier arbeitet

man intensiv an entsprechenden neuen Empfehlungen für die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit, bzw. der Steigerung der Lebensdauer durch HFMI.

Die PIT-Anwendung zeichnet sich durch eine einfache sowie hohe Reproduzierbarkeit aus und ist somit für die verschiedensten Konstruktionen im industriellen Einsatz zu empfehlen. Dies gilt insbesondere speziell für die Schweißung hochfester Nähte bei periodisch schwingend belasteten Bauteilen. Aus diesem Grund zeigt sich nun auch eine verstärkte Nachfrage aus den verschiedensten Industriebereichen.

Speziell bei der Instandhaltung bestehender Konstruktionen ist diese Technologie nicht mehr wegzudenken.

11 Schrifttum

- [1] Radaj D., Vormwald M.: Ermüdungsfestigkeit, 3. Auflage, Springer Verlag, 2007.
- [2] Forschungskuratorium Maschinenbau: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, 6. Auflage. Frankfurt am Main, VDMA-Verlag, 2012.
- [3] Hobbacher A.: IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, WRC Bulletin 520, The Welding Research Council, New York, 2009.
- [4] Haagensen P. J., Maddox S. J.: IIW Recommendations on Methods for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints, Woodhead Publishing, 2013.
- [5] Gerster P.: Erhöhung der Lebensdauer bzw. der Ermüdungsfestigkeit durch Schweißnahtnachbehandlung, der praktiker, Vol. 9, pp. 302-310, 2009.
- [6] Yildirim H., Marquis G.: Overview of fatigue data for high frequency treated welded joints, Welding in the World, vol. 56, pp. 82-96, 2012.
- [7] Marquis G., Mikkola E., Yildirim H., Barsoum Z.: Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed fatigue assessment guidelines, Welding in the World, vol. 57, pp. 803-822, 2013.
- [8] Marquis G., Barsoum Z.: Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed procedures and quality assurance guidelines, Welding in the World, vol. 58, pp.19-28, 2014.
- [9] Leitner M., Stoschka M., Eichlseder W.: Fatigue enhancement of thin-walled high-strength steel joints by high frequency mechanical impact treatment, Welding in the World, Vol. 58, No. 1, pp. 29-39, 2014.
- [10] Yildirim H., Marquis G.: Overview of Fatigue Data for High Frequency Treated Welded Joints, IIW-Document XIII-2362r1-11, 2011.
- [11] Berg J., Stranghöner N.: Ermüdungsverhalten HFH-nachbehandelter Kerbdetails des Mobilkranbaus, Stahlbau 83, Heft 8, 2014.
- [12] Gerster P.: In der Praxis bewährt: Instandhaltung und Reparatur von Schweisskonstruktionen durch höherfrequentes Hämmern, der praktiker, Vol. 9, pp. 336-339, 2010.
- [13] Gerster P., Schäfers F., Leitner M.: Pneumatic Impact Treatment (PIT) – Application and Quality Assurance, IIW-document XIII-WG2-138-13, 2013.
- [14] Gerster P., Schäfers F.: Verfahren zur Erhöhung der Lebens- bzw. Ermüdungslebensdauer von Bauteilen, Stahlbau 83, Heft 8, 2014.
- [15] Leitner M., Stoschka M., Fössl T., Eichlseder W.: Schwingfestigkeit hochfester Stähle an geschweißten Strukturen, Schweiss- und Prüftechnik, No. 1/2012, pp. 12-17, 2012.
- [16] Schäfers F.: Hohe Druckeigenstressungen reduzieren Anlagenausfälle, Maschinenmarkt 22, pp. 56-59, 2011.
- [17] Gerster P., Leitner M., Stoschka M.: Praktische Anwendungen eines höherfrequenten Hämmervorgangs (PIT) in der Industrie, Proceedings of the Join-Ex Congress, Vienna/Austria, pp. 101-112, 2012.
- [18] Stranghöner N., Berg J., Butz C.: Erhöhung der Lebensdauer von Fahrbahnübergängen mit Hilfe des höherfrequenten Hämmerns, 17. DAST-Kolloquium, Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Weimar/Germany, pp. 109-113, 2010.
- [19] Gabrys U.: Empfehlungen für den Neubau und die Instandsetzung von Stahlwasserbauten, Tagungsband zur Großen Schweißtechnischen Tagung 2011, DVS-Berichte, pp. 61-66, 2011.