

Bericht 5125/06

BMBF-Förderkennzeichen: NMT/V/03N3094F

Entwicklung von leichten PM-Aluminium- Einlassventilen für neue Motorgenerationen

Teilprojekt: Reibschweißen und Oberflächenumschmelzen

Der Bericht darf nur ungekürzt und unter Nennung der Urheberschaft der SLV München, NL der GSI mbH, veröffentlicht werden. Die gekürzte oder auszugsweise Veröffentlichung bedarf der vorherigen schriftlichen Genehmigung der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München.

Der Bericht enthält 159 Seiten.

Juni 2006

Entwicklung von leichten PM-Aluminium-Einlassventilen für neue Motorgenerationen

Teilprojekt: Reibschweißen und Oberflächenumschmelzen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Stand der Technik / Theorie	5
2.1	Aluminium als Ventilwerkstoff	5
2.2	PM-Aluminiumwerkstoffe	5
2.3	Verbindungs- und Oberflächentechnik.....	6
3	Zielstellung / Vorgehensweise.....	9
4	Reibschweißen.....	10
4.1	Gerätetechnik, Zubehör, Experimentelles	10
4.1.1	Reibschweißmaschinen.....	10
4.1.2	Spanntechnik und prozessintegrierte Probenbearbeitung	11
4.1.3	Werkstoffe und Probenvorbereitung	12
4.1.4	Vorgehensweise	14
4.2	Prüfung der Reibschweißreignung PMAI-Stahl	14
4.2.1	Reibschweißreignung von Aluminiumlegierungen mit Stahl im Vergleich.....	14
4.2.2	Reibschweißreignung der PMAI-Legierungen mit Stahl im Vergleich.....	15
4.3	Reibschweißen von PMAI-Stahl-Ventilschaftverbindungen	17
4.3.1	Optimierung der Arbeitsbedingungen und Schweißparameter	17
4.3.1.1	Optimierter Reibschweißprozess	17
4.3.1.2	Optimierte Bauteilvorbereitung	19
4.3.2	Werkstoffkombination A250 / 1.4718.....	20
4.3.3	Werkstoffkombination A250 / 1.4718 mit Kegelgeometrie	23
4.3.4	Werkstoffkombination S250 / 1.4718.....	24
4.3.5	Werkstoffkombination A2XX / 1.4718	26
4.3.6	Werkstoffkombination S250 / 1.4718 weichgeglüht.....	27
4.4	Reibschweißen von PMAI S250 mit PMAI C250 partikelverstärkt.....	28
4.5	Zusammenfassung	31
5	Oberflächen-Verschleißschutzbehandlung	34
5.1	Gerätetechnik und Zubehör	34
5.1.1	Plasma-Anlage	34

5.1.2	Laserstrahl-Bearbeitungsanlagen.....	35
5.2	Werkstoffe- und Probenvorbereitung	36
5.3	Oberflächenumschmelzen von PMAI	38
5.3.1	Plasma-/WIG-Umschmelzen	38
5.3.2	Laserstrahl-Umschmelzen.....	40
5.3.2.1	Arbeitsbedingungen	40
5.3.2.2	Umschmelzverhalten verschiedener PMAI-Werkstoffe	41
5.3.3	Umschmelzen von S250 unter Stickstoff-Atmosphäre	44
5.3.3.1	Manuelles Umschmelzen unter Stickstoffatmosphäre.....	44
5.3.3.2	Mechanisieretes Umschmelzen unter Stickstoffatmosphäre.....	45
5.3.4	Zusammenfassung Umschmelzen	46
5.4	Oberflächen-Umschmelzlegieren von PMAI	48
5.4.1	Manuelles Laserstrahl-Umschmelzlegieren mit Drahtzusatzwerkstoff....	48
5.4.2	Mechanisieretes Laserstrahl-Umschmelzlegieren mit Drahtzusatzwerkstoff	49
5.4.2.1	Untersuchung der Prozessbedingungen	50
5.4.2.2	Umschmelzlegieren Ventilsitze S250	51
5.4.2.3	Umschmelzlegieren von Ventilschaftenden	53
5.4.3	Umschmelzlegieren mit thermisch gespritzten Beschichtungen.....	53
5.4.4	Zusammenfassung Umschmelzlegieren.....	54
5.5	Oberflächenbeschichtung durch Thermisches Spritzen.....	56
5.5.1	Thermisches Spritzen - Verfahrensbeschreibung.....	56
5.5.2	Anlage zum Hochgeschwindigkeitsflammspritzen.....	58
5.5.3	Beschichten von PMAI-Probekörpern.....	58
5.5.4	Beschichten von Musterventilen S250	59
5.5.5	Zusammenfassung.....	60
5.6	Laserstrahlhärten von Stahl-Ventilschaftenden.....	61
6	Diskussion.....	65
7	Zusammenfassung	71
8	Schrifttum	75
9	Anhang	77
9.1	Tabellen.....	77
9.2	Bilder.....	84

1 Einleitung

Möglichkeiten, neue Werkstoffe mit Eigenschaften herzustellen, die durch schmelzmetallurgische Techniken nicht zu verwirklichen sind, finden in den letzten Jahren steigendes Interesse. Gewichtsreduzierung, eines der wichtigsten Ziele weltweiter Aktivitäten in den Bereichen der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrt, der Schienenfahrzeuge, aber auch auf anderen Gebieten wie Maschinenbau und Sportartikelindustrie melden hier dringenden Bedarf an. In diesem Zusammenhang kommt dem Werkstoff Aluminium mit seinem geringen Eigengewicht eine hohe Bedeutung zu. Eine zunehmende Nachfrage nach gewichtsreduzierten, aber gleichzeitig hochfesten und temperatur- und verschleißbeständigen Leichtbauteilen forciert in den vergangenen Jahren die Weiterentwicklung von pulvermetallurgisch hergestellten Aluminiumwerkstoffen (PMAI, Bild 1). Dabei tritt eine Substitution von Stahl, herkömmlichen Aluminiumlegierungen und Aluminiumguss durch PM-Aluminiumwerkstoffe in den Vordergrund bei der Entwicklung spezieller Werkstofflegierungen sowie dafür geeigneter Bearbeitungs- und Fügeprozesse.

Ventile in Verbrennungsmotoren (Otto- und Dieselmotoren) werden bisher aus Stahl oder Nickellegierungen hergestellt mit einer Dichte von 7,6 bis 8,2 g/cm³. Als Werkstoffe für Einlassventile kommen zur Zeit für Serienanwendungen ausschließlich Stähle zum Einsatz. Alternative Werkstoffe, wie z.B. Titan, Titanaluminide oder Siliziumnitridkeramik, kommen für Nischenanwendungen im Rennsport (Titan) zur Anwendung, oder befinden sich im Entwicklungsstadium (TiAl, Si₃N₄). Die Einführung von keramischen Ventilen aus z.B. TiN₃ scheitert - neben den Vorbehalten gegenüber dem Spröbruchverhalten dieser Werkstoffgruppe - insbesondere auch an den zu hohen Kosten und Problemen bei der Qualitätskontrolle. Für Auslassventile ist man, nach positiven Anfangserfolgen, z.Zt. dabei, eine erfolversprechende Fertigungsroute für TiAl zu entwickeln. TiAl-Legierungen zeichnen sich insbesondere durch ihre exzellenten Hochtemperatureigenschaften aus. Grundsätzlich sind sie als Werkstoff für Einlass- und Auslassventile geeignet, sind jedoch für Einlassventile technisch überdimensioniert und somit auch zu teuer. Die hohen Zusatzkosten eines TiAl-Einlassventiles können daher grundsätzlich die Einführung von TiAl-Ventilen in Großserienfahrzeugen gefährden.

Für thermisch niedriger beanspruchte Einlassventile (Bild 2) kommt der Einsatz leichter und hochtemperaturbeständiger PMAI-Werkstoffe in Betracht. Das Konzept der Verwendung von voraussichtlich erheblich preisgünstigeren Aluminium-Einlassventilen zusammen mit TiAl-Auslassventilen unterstützt wesentlich auch die Akzeptanz der TiAl-Ventil-Technologie, sowie die Zukunftschancen leichter Ventiltriebe insgesamt.

Leichtbau im Ventiltrieb wurde in den vergangenen 20 Jahren überwiegend dadurch realisiert, dass die Ventil-Abmessungen (Volumen) ständig reduziert und z.B. die Ventilschaft-Durchmesser für PKW-Motoren von Ø8 mm auf Ø6 mm und teilweise

schon auf $\varnothing 5$ mm verringert wurden. Weitere Gewichtsreduzierungen durch hohle, sogenannte Blechmantelventile haben sich in der Praxis bisher nicht bewährt.

Ziel der Entwicklung eines leichten PMAI-Einlassventiles ist hauptsächlich die Gewichtsreduktion im Ventiltrieb zur Reduktion der oszillierenden Massen. Damit kann entweder bei konstanten Federkräften die Grenzdrehzahl erhöht werden (Leistungssteigerung), oder bei reduzierten Federkräften die Reibleistung minimiert werden. Damit verbunden ist auch die Senkung des Verbrauchs und der Emissionen des Motors. Für zukünftige Anwendungen im „nockenwellenlosen“ Motor - z.B. durch elektromagnetische Ventilsteuerung - hat die Massenreduktion noch eine erheblich größere Bedeutung als bei heutigen, über Nockenwellen angesteuerten Ventilen. Nach dem heutigen Wissensstand wird die Einführung dieses Verbrauch und Emissionen reduzierenden Konzepts erst bei der Verwendung leichter Ventile praktikabel. Leichte Ventile bieten ferner Vorteile bei Verwendung in umweltfreundlichen Gasmotoren. Die reduzierte Federkraft führt zu einer deutlichen Reduzierung des bei diesen Motoren kritischen Ventilsitzverschleißes. Insgesamt werden durch den Einsatz leichter Ventile in heutigen Motoren eine Vielzahl von Vorteilen erwartet, u.a. auch durch sekundäre Gewichtseinsparungen.

Um gegenüber etablierten Werkstoffen wettbewerbsfähig zu sein, müssen PMAI-Werkstoffe verschiedene Anforderungen erfüllen, z.B. eine vergleichbar hohe statische und dynamische Festigkeit - auch unter erhöhten Einsatztemperaturen, hohe Verschleißbeständigkeit unter wechselnden Bedingungen, Temperaturwechselfestigkeit und reduzierte thermische Ausdehnung, extreme Gefügestabilität bei hoher Temperatur sowie gute Umform- und Bearbeitbarkeit /1/. Diese pulvermetallurgischen Hochleistungswerkstoffe erreichen um bis zu 40% höhere Festigkeits- und Steifigkeitswerte im Vergleich zu herkömmlichen Aluminiumlegierungen, einhergehend mit einer deutlich gesteigerten Warmfestigkeit (Bilder 3 - 6). Diese Eigenschaften werden beeinflusst durch gezielt eingebrachte, thermisch stabile Hartphasen, die im Gegensatz zu den konventionell härtend wirkenden Phasen auch bei höheren Einsatztemperaturen noch beständig sind /2/.

Allein der hochwertige PMAI-Grundwerkstoff ermöglicht noch nicht den Einsatz als leichtes Einlassventil. Ähnlich wie bei Stahlventilen sind auch für PMAI-Ventile zusätzliche Maßnahmen zur Steigerung der Härte und Verschleißbeständigkeit in lokal besonders beanspruchten Regionen des Ventils notwendigerweise zu erwarten. Für Stahlventile sind diese Bearbeitungsprozesse bekannt, z.B. das Panzern (Auftragschweißen) des Ventilsitzes, das Beschichten des Ventilschaftes, oder das Härten des Ventilschaftendes. Für PMAI-Ventile müssen geeignete Prozesse der Oberflächen- und Fügetechnik erst entwickelt werden.

Im Rahmen dieses Teilprojektes wurden Untersuchungen dahingehend durchgeführt, inwieweit für verschiedene PMAI-Werkstoffe eine weitere Steigerung der Werkstoffeigenschaften, speziell im Hinblick auf die Verschleißbeständigkeit, erzielt werden kann: Entweder durch das Reibschweißen mit einem artfremden Werkstoff (Stahl), durch das Oberflächenumschmelzen oder das Oberflächenumschmelzenlegieren (Auftragschweißen).

7 Zusammenfassung

Im Rahmen des Verbundprojektes "Entwicklung von leichten PM-Aluminiumventilen für neue Motorgenerationen" wurde von der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München das Teilprojekt "Reibschweißen und Oberflächenumschmelzen" durchgeführt. Die Themenstellung beinhaltet die Entwicklung von Verfahren zur Steigerung der lokalen Verschleißbeständigkeit an PMAI-Ventilen, insbesondere für die besonders verschleißbeanspruchten Bereiche am Ventilsitz und am Ventilschaftende. Hierzu wurde das Reibschweißen, das Oberflächenumschmelzen und weitere Verfahren erprobt.

Das Reibschweißen ist grundsätzlich zum Fügen von Werkstoffkombinationen wie z.B. Aluminium/Stahl-Verbindungen geeignet, die sich nicht durch Schmelzschweißverfahren herstellen lassen. Deshalb wurde untersucht, inwieweit das Reibschweißen auch zum Fügen eines verschleißbeständigen Schaftendstückes aus Stahl an den PMAI-Ventilschaft geeignet ist. Die Versuche wurden auf 2 Reibschweißmaschinen durchgeführt - einer pneumatischen 1,5-t-Kleinreibschweißmaschine "Harms&Wende RSM 200/210" und einer elektromechanischen 4-t-Reibschweißmaschine "KUKA RS4E".

Die Vorversuche mit verschiedenen Aluminiumlegierungen an Hohlquerschnitten $\varnothing 17 \times 4$ mm zeigen, dass die Reibschweißung weniger vom Stahlwerkstoff, sondern vorwiegend von der Aluminiumlegierung abhängt. Besonders hohe Zugfestigkeitswerte ($R_m = 336 \text{ N/mm}^2$) werden mit der warmfesten Aluminiumlegierung AlCuMg2 erzielt. Im direkten Vergleich dazu wurde mit einer PMAI-Legierung AlSi17Fe5Cu3,5Zr0,6 (S230) eine nur geringe Zugfestigkeit von 117 N/mm^2 erreicht. Dieser erste Vergleich erfolgte an wenigen Schweißproben ohne Prozessoptimierung. Eine im Vergleich eingeschränkte Reibschweißung des PMAI-Werkstoffes mit Stahl lässt sich daraus ableiten.

Das Reibschweißen von Stahl X45CrSi9-3 (1.4718) an PMAI-Ventilschaftenden aus A250, A2XX und S250 erfolgte an Schaftquerschnitten $\varnothing 7,7$ mm (unbearbeitet) bis $\varnothing 6,6$ mm (vorbearbeitet). Die unter Verschleißaspekten guten tribologischen Eigenschaften des PMAI erweisen sich als Beeinträchtigung für das Reibschweißverhalten. Die Werkstoffpaarung PMAI-Stahl zeigt ein ausgeprägtes Gleitverhalten (niedriger Reibungskoeffizient). Die sonst typische und für das Reibschweißen günstige Fressneigung von Al-Werkstoffen mit Stahl fehlt weitgehend. Daher sind hohe Reibdrücke $150 - 190 \text{ N/mm}^2$ erforderlich, um bei kurzen Reibzeiten ausreichend Reibungswärme erzeugen zu können.

Von besonderer Bedeutung ist auch die Bauteilvorbereitung: Das Stahlteil muss drehend gespannt und prozessintegriert (trocken) plangedreht werden, um eine blanke, planschlagfreie Reibfläche am sich nicht verformenden Werkstück zu erreichen. Die Reibfläche des PM-Aluminium muss frisch trocken plangedreht sein, um infiltrierte Trennmittelreste oder unterschiedliche Oxidschichteinflüsse auszuschließen. Die Anfasung der Reibflächenkanten mindert die Wulsrissneigung (Folge der eingeschränkten Warmverformbarkeit der hochwarmfesten PMAI-Legierungen).

Die besten Verbindungseigenschaften reibgeschweißter PMAI/Stahl-Reibschweißverbindungen werden mit einer Drehzahl von 5.000 1/min, einer Reibzeit von 0,5 s, einem Reibdruck von ca. 170 N/mm², einem Stauchdruck von ca. 250 N/mm² erzielt. Dabei stellt sich eine Verkürzung von 2,5 mm (A2XX) - 3,5 mm (S250) ein. Die Verkürzung beim Reibschweißen erfolgt nur aluminiumseitig und ist als Längenaufmaß vor dem Reibschweißen vorzusehen. Die Zugfestigkeit der Verbindungen erreicht 50 - 75 % der Festigkeit der PMAI-Grundwerkstoffe. Für S250 liegt die gemessene absolute Festigkeit des Grundwerkstoffes (323 N/mm²) und die Festigkeit der Verbindungen (196 - 265 N/mm²) niedriger als bei A2XX. Dafür fällt die Festigkeit der S250-Verbindungen bei Wulstrissigkeit weniger ab. Aufgrund der besseren Warmverformbarkeit und des geringeren Oxidanteils im Werkstoff werden mit S250 die insgesamt stabileren Arbeitsbedingungen beim Reibschweißen mit Stahl eingestellt. Dennoch wird die erreichte Zugfestigkeit von 50 - 75% des Grundwerkstoffes letztlich als nicht ausreichend erachtet für den Einsatz eines reibgeschweißten Stahl-Ventilschaftendes zur Verbesserung des Verschleißschutzes.

Als Alternative zum Stahl-Schaftende wurden Ventile S250 mit Schaftenden aus partikelverstärktem PM-Aluminium C250 (S250 + 10% SiC) reibgeschweißt. Beim Reibschweißen dieser artähnlichen Werkstoffkombination erfolgt die Verbindung über die bei beiden Werkstoffen gleiche Aluminiummatrix S250. Die Arbeitsbedingungen unterscheiden sich deutlich von den PMAI-Stahl-Verbindungen: Drehzahl 2.200 1/min, Reibzeit 0,5 s, Reib-/Stauchdruck 90 / 160 N/mm², Verkürzung 5 - 7 mm. Mit optimierten Arbeitsbedingungen wird eine Zugfestigkeit von 72 - 98 % des Grundwerkstoffes (234 - 317 N/mm²) erreicht. Der Bruch tritt dabei außerhalb der Verbindungszone im Bereich des Wulstansatzes (Wärmeeinflusszone) auf. Die Streuung der Prüfergebnisse ist vorrangig auf maschinelle Einflüsse und unterschiedliche Prüfbedingungen zurückzuführen. Ohne diese Einflüsse ist davon auszugehen, dass reibgeschweißte Schaftverbindungen S250/C250 reibgeschweißt werden können, die etwa 90% der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes erzielen. Der partikelverstärkte Werkstoff kann mittels Reibschweißverbindung als verschleißfestes Ventilschaftende eingesetzt werden - ggf. in Verbindung mit einer zusätzlichen PVD-Beschichtung.

Das Oberflächen-Umschmelzen von PMAI-Werkstoffen wurde mit dem Plasma- und dem Laserverfahren erprobt. Beim Plasma-Umschmelzen ist die Wärmeeinbringung für kleine Probenkörper (Aluminiumventile) zu groß. Die Wärmeeinbringung erfolgt nicht konzentriert genug, nicht dosiert genug und nicht schnell genug (Zündverzug). Das Plasma-Umschmelzen führt sowohl an sprühkompaktiertem PMAI (S250), als auch noch mehr an verdüstem PMAI (A250) zu starker Porenbildung und zum "Aufschäumen" des Werkstoffes und ist daher nicht zur Oberflächenbehandlung kleiner PMAI-Körper geeignet.

Das Laserstrahl-Oberflächenumschmelzen ist das präzisere Verfahren zur Oberflächenbehandlung kleiner PMAI-Teile - sofern sprühkompaktierter PMAI-Werkstoff (z.B. S250) bearbeitet wird. Die Porenbildung kann beim Umschmelzen unter geeigneten Prozessparameter praktisch vollständig verhindert werden. Der verdüστε PMAI-

Werkstoff A250 hingegen neigt auch beim Laserstrahl-Oberflächenschmelzen zu starker Porenbildung. Somit hat sich die Kombination des Laserstrahl-Oberflächenschmelzens mit sprühkompaktiertem Ventilwerkstoff als einzig praktikable Ausführungsvariante für das Umschmelzen von PMAI-Ventiloberflächen herauskristallisiert. Die erzeugte Einbrand- bzw. Einhärtetiefe beträgt bis 0,4 mm. Die Härte in der Umschmelzzone von 270 HV - 330 HV wird im Vergleich zum Grundwerkstoff (S250: ca. 125 HV) bis auf das 2,5-fache gesteigert. In Relation zu einer gehärteten Stahlventil-Oberfläche (>50 HRC bzw. 515 HV) erscheint die allein durch Umschmelzung erzielbare Härte noch nicht hoch genug für den angestrebten Verschleißschutz an einem PMAI-Ventil.

Als weitere Maßnahmen zur Steigerung der Verschleißbeständigkeit wurde deshalb das Laserstrahl-Umlegieren der Oberflächen (Umschmelzen mit Schweißzusatz) untersucht. Das Umschmelzlegieren kleiner PMAI-Teile erfordert eine mechanisierte Ausführung, um reproduzierbar hohe Arbeitsgeschwindigkeiten ohne thermische Überlastung des PMAI-Werkstoffes zu erreichen. Bei Verwendung artähnlicher Drahtzusätze (AlSi5, AlMg4,5Mn) wird gegenüber dem PMAI-Grundwerkstoff S250 (125 HV) keine nutzbare Härtesteigerung erzielt. Eine deutliche Härtesteigerung stellt sich hingegen mit artfremden Zusatzwerkstoffen ein - mit Nickelbasis-Zusatzdraht ca. 900 HV, oder mit Al-Bronze-Zusatz CuAl8 (AlBz8) ca. 700 HV. Diese Härtewerte übertreffen den angestrebten Vergleichswert für Stahlventile von 50 HRC bzw. 515 HV deutlich, zu Lasten einer teils ausgeprägten Rissneigung. Die bislang besten Arbeitsbedingungen werden mit Nickelbasis-Drahtzusatzwerkstoff erreicht. Für homogenem Schichtauftrag ist die mögliche Bearbeitungsgeschwindigkeit tendenziell aber noch zu langsam - bedingt durch die Trägheit der mechanischen Drahtzuführung bei kurzen Bearbeitungsbahnen. Während am PMAI-Ventilsitz bei größerer Umlaufbahn nahezu fehlerfreie Umlegierungen der Oberfläche erzielt werden (900 HV, Breite 2 mm, Tiefe 0,5 - 0,8 mm), kann das PMAI-Ventilschaftende wegen thermischer Überlastung mit Drahtzusatz nicht geeignet umlegiert werden.

Beim Umschmelzlegieren spritzbeschichteter PMAI-Oberflächen entfällt das Hemmnis einer trägen mechanischen Drahtzuführung für hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten bei kurzer Taktung. Die Schweißzusatzwerkstoffe sind bereits aufgetragen. Umlegiert wurden aufgespritzte Hartstoffschichten Ni17CrFe3,5B und CrC-NiCr75-25 mit Schichtdicken 25 bzw. 40 µm auf PMAI S230 und S250. Damit lassen sich gegenüber drahtförmigem Schweißzusatz Spuren vergleichbarer Breite, aber vergrößerter Tiefe 1 mm erzielen. Nachteilig ist die beidseitige Porenbildung am Rand der Umschmelzzone unter der Beschichtung, die das Ausgasen behindert. So kommt das Umschmelzlegieren von PMAI mit aufgetragenen Schichten nur in Betracht, wenn diese ausreichend porös bzw. gasdurchlässig sind, oder sequenziell nur im Bereich der Umschmelzspur aufgetragen werden können.

Als weitere Variante zur Steigerung der lokalen Verschleißbeständigkeit wurde das Auftragen von Hartstoffschichten durch Thermisches Spritzen untersucht. Das Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen von Hartstoffschichten zum Beschichten von PMAI-Grundwerkstoff S250 (ohne nachfolgendes Umschmelzen) ermöglicht eine deutliche

Härtesteigerung an der Bauteiloberfläche. Je nach Pulverzusatzwerkstoff können Oberflächen-Härtewerte zwischen 900 HV (CrC-NiCr) und etwa 1200 HV (WC-Co) an den Probenoberflächen eingestellt werden. Die Schichtdicke ist variabel einstellbar. Diese Hartstoffschichten sind aber rau und sind daher mit den Verschleißpartnern (Ventilsitz, Ventiltrieb) tribologisch nicht verträglich (Partner-Verschleiß). Um eine zusätzliche PVD-Beschichtung aufbringen zu können, die besser tribologisch verträglich ist, müsste die raue Schicht erst geschliffen werden. Das ist schwer möglich und daher unter Serienaspekten nicht wirtschaftlich praktikabel. An einigen weiterverarbeiteten und PVD-beschichteten Ventilen wurden zudem Schichtabplatzungen festgestellt. Auch wenn aus diesen Gründen die thermisch aufgespritzten Hartschichten keine geeignete Oberflächentechnologie für die Fertigung von PMAI-Ventilen darstellt, so ist diese Beschichtungsart durchaus für den Einsatz bei anderen Anwendungen vorstellbar, z.B. zur Herstellung leichter PMAI-Schleifwerkzeuge mit guter Wärmeabführung.

Als zusätzliches Verfahren der Oberflächenbehandlung zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit wurde das Laserstrahlhärten von Stahl-Ventilschaftenden aus X45CrSi9-3 untersucht. Während herkömmliche Voll-Stahlventile am Schaftende induktiv gehärtet werden können, ist bei reibgeschweißten PMAI/Stahl-Schaftenden ein Verfahren zur Oberflächenhärtung des Stahls mit begrenzter Wärmeeinbringung nötig, um die Reibschweißverbindung nicht zu zerstören. Mit dem Laserstrahlhärten wird die angestrebte Härtesteigerung (mind. 600 HV) bei gleichzeitig lokaler Begrenzung der Wärmebeeinflussung erreicht. Die Einhärtetiefe liegt bisher bei 0,9 - 1,2 mm. Die Spurbreite lässt sich durch Defokussierung des Laserstrahl bis auf eine Breite von 3 mm erhöhen. Bei mehreren nacheinander ausgeführten Härtespuren ist eine mögliche Beeinflussung überlappender Spurbereiche durch Anlasseffekte zu berücksichtigen. Alternativ können mehrere Spuren mittels Doppelstrahltechnik gleichzeitig ausgeführt werden. Die Nutzung der Ergebnisse zum Laserstrahlhärten von Ventilstahl ist nicht auf PMAI/Stahl-Ventile eingeschränkt, sondern allgemein auch auf herkömmliche Stahlventile oder reibgeschweißte TiAl/Stahl-Ventile übertragbar.

Im Rahmen dieses Teilprojektes wurde das Reibschweißen, das Umschmelzen und weitere Verfahren der Oberflächentechnik erprobt, die nicht nur für die Entwicklung leichter PMAI-Ventile benötigt werden, sondern auch in vielen anderen Bereichen anwendbar sind. Über die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse hinaus verfügt die Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt SLV München über ein umfassendes Know-How zu fägetechnischen Prozessen, um damit die Industrie bei der Einführung neuer Fertigungsprozesse und innovativer Produkte zu unterstützen.

München, den 25.06.2006


Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. D. Böhme