

Numerische Simulation von Plasmaspritzprozessen

Hohe Temperaturgradienten innerhalb von Millimetern

Die Entwicklung numerischer Modelle zur Simulation von Plasmaspritzprozessen bei Sulzer Innotec hat in den letzten Jahren viel zum Verständnis der physikalischen Vorgänge in Plasmaspritzpistolen beigetragen. In Zusammenarbeit mit Sulzer Metco wurden die Modelle kontinuierlich erweitert, auf verschiedene Spritzprozesse angewendet und nach Möglichkeit validiert.

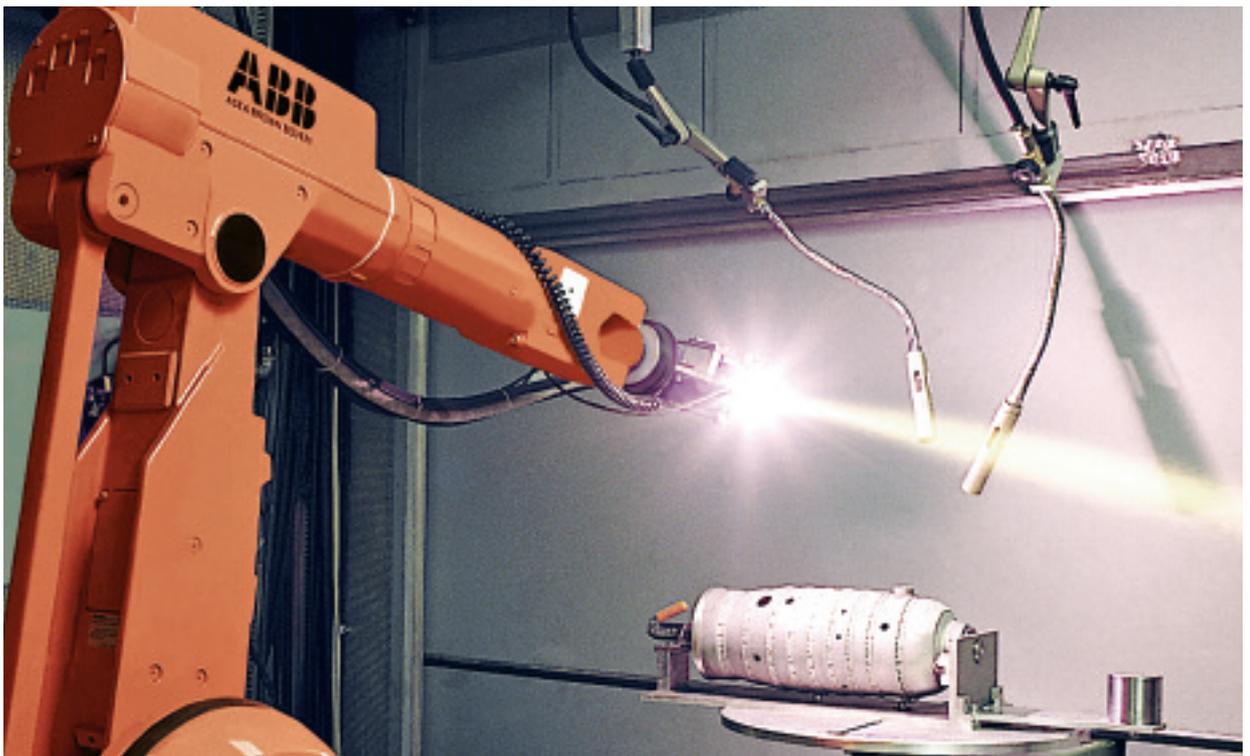
Bei Plasmaspritzprozessen wird ein Gasgemisch in einer Düse beschleunigt. Direkt nach dem Düsenaustritt wird das Pulver radial zugegeben, welches dann die Schicht auf dem Substrat bildet ¹. Die thermische Energie, welche zum Aufschmelzen des Pulvers notwendig ist, wird durch einen elektrischen Lichtbogen innerhalb der Düse erzeugt. Um diese komplexen phy-

sikalischen Phänomene innerhalb und außerhalb der Düse auf numerischer Ebene abzubilden, ist eine Kopplung der Strömungstechnik (Navier-Stokes) mit der Elektromagnetik (Maxwell) erforderlich. Diese Kopplung wird über die Widerstandserwärmung im Gas sowie die Lorentzkraft aus Magnetfeld und Stromstärke ausgeführt und nennt sich Magneto-Hydrodynamik (MHD).

Gastemperaturen von 30000 K

Die elektrische Leistung, welche durch den Lichtbogen in Wärme umgewandelt wird, liegt typischerweise im Bereich von 25–130 kW. Daraus folgen maximale Gastemperaturen von bis zu 30000 K innerhalb der Pistole. Für die Simulation des Prozesses ist es deshalb unerlässlich, dass die Stoffdaten des Gasgemisches bis zu diesen hohen Temperaturen hin

¹ F4-Plasmaspritzpistole, montiert auf einem ABB-Roboter, beim Spritzen von Turbinenteilen.



richtig hinterlegt sind, da die Dissoziation und die Ionisation der Teilchen die Eigenschaften der Gase stark beeinflussen.

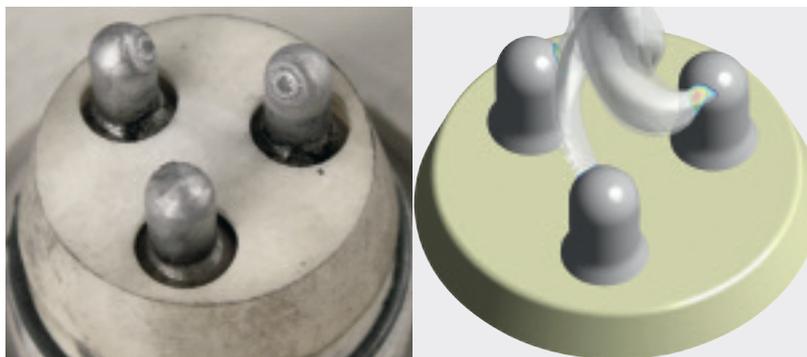
Solch hohe Leistungsdichten führen natürlich auch zu hoher Beanspruchung des Düsenmaterials, weshalb eine Kühlung der einzelnen Komponenten unabdingbar ist. Dies geschieht bei den meisten Prozessen über einen integrierten Wasserkreislauf. Bis zu 50% der elektrischen Leistung wird bei Plasmaspritzprozessen hauptsächlich über Strahlung an das Düsenmaterial und somit an das Kühlwasser abgegeben, um ein Überhitzen der Komponenten zu vermeiden. Folglich ist es sehr wichtig, dass auch der Energieverlust durch Strahlung des Lichtbogens numerisch möglichst genau abgebildet wird.

Modellvalidierung anhand der TriplexPro™-200

Die Validierung solcher komplexer physikalischer Phänomene ist enorm wichtig. Für die Anwendung der ersten MHD-Simulationen wurde die Modellierung der TriplexPro™-200 von Sulzer Metco ausgewählt, da sich diese mit ihren drei Kathoden durch eine hohe Prozessstabilität auszeichnet.

Quantitativ konnten nur globale Größen wie die elektrische Leistung, die Wärmeverluste an das Kühlwasser und der Druck am Eintritt gemessen und mit den Resultaten verglichen werden. Da die Messung von einzelnen Zustandsgrößen wie Gasgeschwindigkeit, Gastemperatur usw. in der Pistole nicht möglich ist, wurde zur weiteren Validierung der Simulationsergebnisse auch auf qualitative Vergleiche zurückgegriffen.

Solche qualitative Vergleiche sind Form und Position der Lichtbogen-Ansatzpunkte auf der Kathode [2] und der Anode. Weiters weist die TriplexPro-200 einen sogenannten «consolidation point» auf. Dies ist jene Position in der Kammer, wo die Strömung der einzelnen Gaseinlässe in eine axiale Drallströmung wechselt. Die exakte Position lässt sich durch Spuren an der Kammerwand erkennen und mit den Resultaten aus der Strömungssimulation vergleichen. Es wurden trotz numerischen Verein-



[2] Der qualitative Vergleich der Lichtbogen-Ansatzpunkte aus der Simulation mit abgenutzten Kathoden der TriplexPro™-200 dokumentiert die Genauigkeit der Simulation.

fachungen und einigen Modellannahmen sehr gute Übereinstimmungen zwischen Realität und Simulation erzielt. In einer zweiten Runde wurden die Modellparameter noch leicht angepasst und anschließend für verschiedene Prozessparameter erfolgreich getestet.

Anwendung des Modells auf die F4-Spritzpistole

Das bestehende und anhand der TriplexPro-200 validierte Simulationsmodell wurde anschließend auf eine andere Spritzpistole des Typs F4 von Sulzer Metco angewendet. Dabei stand die Optimierung des Kühlkreislaufes im Vordergrund, was eine Erweiterung des Modells nötig machte. Es galt die Wasserführung geometrisch so zu verändern, dass die Belastung im Material nicht zu groß wird und trotzdem möglichst wenig Energie an das Kühlwasser abgegeben wird. Auch müssen die Temperaturen im Kühlwasser unterhalb des Siedepunktes gehalten werden, da dies lokal zu einer drastischen Verringerung des Wärmeübergangs führen würde.

Die Simulation wurde aufgrund der physikalischen und geometrischen Komplexität in zwei Simulationsschritten unterteilt. Als erstes wurde die Plasmaströmung und die daraus resultierende Wärmebelastung durch Strahlung und Konvektion auf die Düsenwand berechnet. Da es sich bei der F4 um eine ein-kathodige Pistole handelt, konnte die Strömung in der Düse nicht mehr als quasi-stationär betrachtet werden. Der Ansatzpunkt des Lichtbogens auf der Anode ändert sich zeitlich stark in axialer wie auch in Umfangsrichtung, was am Sägezahnverlauf der elektrischen

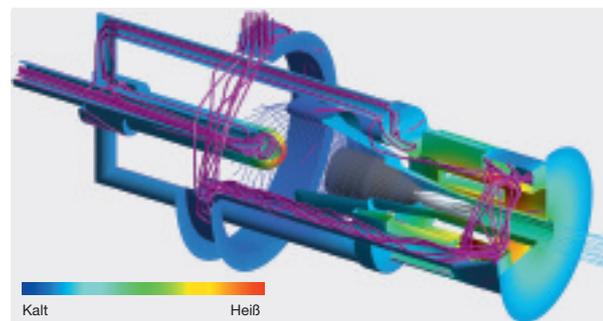
Spannung zu erkennen ist. Diese Schwankungen liegen jedoch im kHz-Bereich und dürfen in einer guten Näherung in Umfangs- und in axialer Richtung zeitlich gemittelt werden.

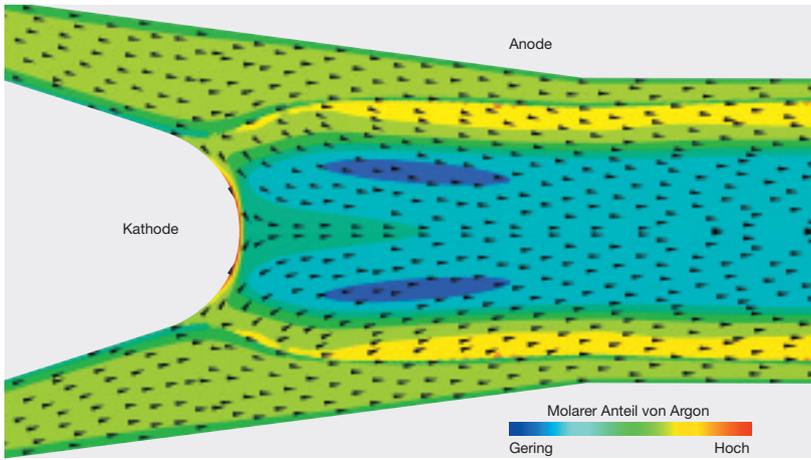
Die gemittelte thermische Belastung wurde anschließend einer weiteren Simulation übergeben, welche die Wärmeleitung im Material und die Strömung im Kühlkreislauf berücksichtigt. Mit geeigneten Variationen des Designs konnte die Führung des Kühlwassers optimiert und die thermische Belastung des Düsenmaterials entscheidend verringert werden [3].

Entmischung des Plasmagases – ein Phänomen hoher Gradienten

In den meisten Fällen werden Gasgemische (z.B. Argon-Helium) als Plasmagas verwendet. Bis anhin wurden die Gase als homogenes Gemisch berücksichtigt und deren Eigenschaften entsprechend gewichtet. In der Realität kommt es jedoch, getrieben durch lokale Gradienten im molaren Anteil, in der Temperatur, im Druck und im elektrischen Feld, zu

[3] Die hohen Temperaturen führen zu einer hohen Beanspruchung des Materials, weshalb eine Wasserkühlung notwendig ist. Das Bild zeigt die Stromlinien und Temperaturverteilung im Kühlwasserkreislauf der F4-Spritzpistole.





4 Die hohen Temperaturgradienten führen zu einer Entmischung der Prozessgase. Das Bild zeigt den molaren Anteil von Argon im Gasgemisch innerhalb einer vereinfachten F4-Spritzpistole.

Entmischung der einzelnen Gaskomponenten 4. Dies wiederum resultiert in einer ortsabhängigen variablen Zusammensetzung des Gases und führt somit zu unterschiedlichen Stoffeigenschaften. Mit der Implementierung der temperatur- und druckabhängigen Diffusionskoeffizienten konnten wichtige Entmischungseffekte im Bereich der Kathode gezeigt werden.

Thermische Belastung der Elektroden

Die Elektroden einer Plasmaspritzpistole sind einer starken thermischen Belastung ausgesetzt. Gerade am Ansatzpunkt des Lichtbogens auf der Kathode treten enorme Temperaturgradienten auf, da die Temperatur auf einer sehr kurzen Distanz von der Oberflächentemperatur der Kathode auf Plasmatemperatur ansteigt. In diesem Bereich kommt es im Betrieb zu einem Ungleichgewicht von Ionen und Elektronen 5.

Die leichten Elektronen diffundieren schneller in dieses Gebiet geringeren Ionisationsgrades. Aufgrund dieser ambipolaren Diffusion entsteht direkt an der Kathode ein zusätzliches elektrisches Feld, welches die Ionen in Richtung Kathode beschleunigt. Dort kommt es in

Kathodenähe zu der Rekombination und somit zu einer Freisetzung der Ionisationsenergie. Gleichzeitig emittiert auch die heiße Kathode Elektronen und kühlt diese durch die sogenannte Thermoemission.

Diese thermische Wechselwirkung zwischen Kathode und Plasmagas wurde in einem weiteren Projekt numerisch untersucht. Dazu wurde die vereinfachte, rotationssymmetrische Umströmung einer F4-Kathode im Betrieb gewählt, da im Elektrodengebiet ein sehr feines Rechengitter benötigt wird. Es hat sich gezeigt, dass die Belastung am Rand des Ansatzpunktes am höchsten ist, da in dieser Randzone die Kühlung durch Thermoemission fast komplett wegfällt. Der direkte qualitative Vergleich mit abgenutzten Kathoden zeigte eine gute Übereinstimmung mit den erzielten Resultaten aus den Simulationen.

Neuartiger Prozess zur Erzeugung thermischer Schutzschichten

Ein neuartiger Prozess zur Erzeugung von thermischen Schutzschichten (TBC) ist das PS-PVD (*Plasma Spray Physical Vapor Deposition*). Dabei wird eine Hochleistungspistole des Typs O3CP in einer

Vakuummkammer bei Absolutdrücken von 1,5mbar betrieben. Das Pulver wird dabei innerhalb der Düse zugegeben und im Flug aufgeschmolzen und sogar verdampft. Dieser Dampf kondensiert wiederum auf dem relativ kalten Substrat und bildet so eine kolumnare Schicht.

Die Strömung in der Vakuummkammer kann mit standardmäßigen CFD-Methoden, welche auf der Kontinuumsmechanik basieren, nicht mehr abgebildet werden. Aus diesem Grund wurde die Düsenaustrittsregion auf ein Minimum reduziert. Der Fokus dieser Arbeit lag auf der Untersuchung des Partikelverhaltens vom Eintritt in die Düse bis zur Verdampfung. Dabei wurden auch verschiedene Geometrievariationen der Pulverzuführung in die Düse und deren Einfluss auf die Partikelbewegung untersucht.

Vertiefte Prozesskenntnisse dank modernster Simulationsmethoden

Die Anpassung und Erweiterung der MHD-Methodik auf Anwendungen in der Plasmaspritztechnik haben in den letzten Jahren zu einem vertieften Verständnis der physikalischen Vorgänge in Spritzprozessen beigetragen. Die stetige Steigerung der Rechnerleistung hilft dabei, die hohen Anforderungen an die numerische Simulation komplexer Prozesse zu befriedigen. Das so generierte Prozessverständnis hilft den Entwicklern von Sulzer Metco, bestehende Produkte zu optimieren. Ebenfalls fließen die gewonnenen Erkenntnisse in die Entwicklung neuer Produkte ein.

Reto Wäger
 Sulzer Markets and Technology AG
 Sulzer Innotec
 Sulzer-Allee 25
 8404 Winterthur
 Schweiz
 Telefon +41 52 262 42 50
 reto.waeger@sulzer.com

5 Schematische Darstellung der physikalischen Vorgänge im Elektroden-Fallgebiet.

