

Radioskopie an schmelzflüssigen Metallen zur Prozeßoptimierung

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Universität Hannover

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christian Reichert

geboren am 21.05.1968 in Neumünster

2001

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. G. Redeker

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. D. Stegemann

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. H. Haferkamp

Tag der Promotion: 06.02.2001

Abstract **- deutsche Version -**

Reichert, Christian

Radioskopie an schmelzflüssigen Metallen zur Prozeßoptimierung

In dieser Arbeit wurden die örtlich hochauflösenden Durchstrahlungsverfahren der Mikrofokusradioskopie und der Hochgeschwindigkeits-Mikrofokusradioskopie in Kombination mit rechnergestützter Bildverarbeitung erstmalig sowohl in grundlegender Form am Prozeßmodell, als auch in praxisorientierter Form an Prozessen mit schmelzflüssigen Metallen eingesetzt. Gegenstand dieser Untersuchungen ist die Beschreibung dynamischer und z.T. hochdynamischer Vorgänge in schmelzflüssigen Metallen, die im Bereich des Gießens von Aluminium und bei Verfahren der Oberflächenvergütung durch Laserstrahldispersieren stattfinden. Der Einsatz anderer prozeßintegrierbarer Prüfverfahren wird erschwert bzw. ist unmöglich, da diese Prozesse durch optische und/oder mechanische Unzugänglichkeit sowie durch hohe Temperaturen erschwerte Bedingungen zur Prozeßanalyse aufweisen.

Im Bereich Aluminiumkokillenguß wurde mit Hilfe eines Gießmodells ein grundlegendes Konzept zur Erfassung, Analyse und Bewertung von dynamischen Vorgängen, die innerhalb der Einfüll-, Erstarrungs, und Abkühlphasen beim Gießprozeß auftreten, erarbeitet. Dieses Konzept beinhaltet zunächst die on-line Erfassung der Prozeßdynamik mittels Mikrofokusradioskopie. Zu ihrer Analyse und Bewertung wurden aufgrund des großen Bilddatenumfangs automatisierte, anwenderunabhängige Methoden und Algorithmen auf Basis der digitalen Bildverarbeitung entwickelt und zur automatisierten Gießfehlerdetektion und -klassifikation während des Gießvorgangs eingesetzt.

In weiteren Schritten wurden die beim Aluminiumkokillenguß in Grundlagenuntersuchungen erarbeiteten Methoden auf praxisbezogene Prozesse angewendet. Hierbei wurden zunächst im Bereich Aluminiumsandguß mittels angepaßter Mikrofokusradioskopie Einfüll-, Speisungs- und Erstarrungsvorgänge on-line erfaßt, um neuartige Methoden mittels moderner Speisungstechniken zu erproben und Möglichkeiten zur Prozeßoptimierung aufzudecken.

Im Anschluß daran wurde die für den Aluminiumkokillenguß konzipierte Prüfmethode genutzt und in erweiterter, modifizierter Form durch Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera bei Untersuchungen zum Laserstrahldispersieren eingesetzt. Dabei wurden Schmelzbadströmungen hinsichtlich der Hartstoffpartikelbewegungen mittels Hochgeschwindigkeits-Mikrofokusradioskopie erstmals experimentell erfaßt und analysiert.

Abstract
- english version -

Reichert, Christian

Radioscopy on molten metals for process optimization

This work shows applications of high resolutional x-ray techniques as microfocus-radioscopy and high-speed microfocus-radioscopy in combination with digital image processing. The applications are described for the first-time on a basic process model as well as in a praxis-oriented form on processes with molten metals. The aim of this investigations is the description of dynamic and partly high dynamic events in molten metals which occur in the field of aluminium casting and laser dispersing processes. The use of other process integrable diagnostic techniques is difficult because of optical and mechanical inaccessibility and high process temperatures.

In the field of aluminium mould casting a basic concept was worked out for the detection, analyzation and evaluation of dynamic events which occur during the filling-, solidification- and cooling processes. This concept includes the on-line detection of the process dynamic due to microfocus-radioscopy. For analyzation and evaluation automated methods and algorithms based on digital image analysis were developed and used for the detection and classification of casting defects during the casting process.

Further on this work describes possibilities to use the developed methods for actual industrial problem states in the field of process optimization. In the field of aluminium sand casting due to adapted microfocus-radioscopy filling-, feeding- and solidification processes were detected on-line to test new feeding methods and to find out possibilities for process optimization using modern feeding techniques.

The application of microfocus-radioscopy in combination with a high-speed camera is shown in the last part of this work. This combined method is used to get informations for process optimization of the Laser-dispersing process. During this investigations it was possible for the first-time to visualize and analyse quantitatively high-dynamic flow configurations inside the molten bath by tracking hard particle movements.

Schlagworte

Mikrofokusradioskopie
Gießen
Laserstrahldispersieren
Prozessoptimierung

-

Keywords:

-

Microfocus-radioscopy

-

Casting

-

Laser dispersing

-

Process optimization

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1.0 Einleitung	1
2.0 Zielsetzung und Konzept der Arbeit	3
3.0 Grundlagen der angewandten Prüftechnik	5
3.1 Konventionelle Mikrofokusradioskopie	5
3.2 Hochgeschwindigkeits-Mikrofokusradioskopie	16
3.3 Digitale Bildverarbeitung	17
3.4 Temperaturmessung und –analyse	24
4.0 Untersuchte Fertigungsprozesse	25
4.1 Aluminiumguß in Kokille und Sand	25
4.1.1 Grundlagen von Aluminium-Gußlegierungen	26
4.1.2 Schwerkraftkokillenguß	36
4.1.3 Schwerkraftsandguß	37
4.1.4 Niederdrucksandguß	38
4.1.5 Filterspeiser-Technik	39
4.2 Laserstrahldispergieren	39
5.0 Beschreibung der Versuchsprüftechnik	42
5.1 Mikrofokusradioskopieanlage	42
5.2 Rechnergestützte Hochgeschwindigkeitskamera	45
5.3 Digitales Bildverarbeitungssystem	46
5.4 Mehrkanal-Temperaturerfassungssystem	48
6.0 Versuchsaufbauten	49
6.1 Aluminium-Schwerkraftkokillenguß	49
6.2 Aluminium-Schwerkraftsandguß	50
6.3 Aluminium-Niederdrucksandguß	53
6.4 Laserstrahldispergieren	54

7.0 Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse	56
7.1 Gießfehlerdetektion und –klassifikation beim Schwerkraftkokillenguß	56
7.1.1 <i>Konzept zur Gießprozeßoptimierung</i>	57
7.1.2 <i>Fehlersegmentierung und –merkmalsextraktion mit digitaler Bildverarbeitung</i>	58
7.1.3 <i>Klassifikationsergebnisse</i>	63
7.2 Erfassung von Speisungs- und Erstarrungsvorgängen beim Aluminiumsandguß	67
7.2.1 <i>Speisungs- und Erstarrungsvorgänge bei modernen Filterspeisern</i>	67
7.2.2 <i>Chemisch unterstützte Speisungsvorgänge</i>	71
7.2.3 <i>Speisungs- und Erstarrungsvorgänge beim Niederdrucksandguß</i>	75
7.2.4 <i>Fazit zum Aluminiumsandguß</i>	79
7.3 Räumliche Verfolgung von Hartstoffpartikeln beim Laserstrahldispersieren	80
7.3.1 <i>Festlegung der maximalen Bildaufnahmefrequenz</i>	80
7.3.2 <i>Kombination Substratwerkstoff-Hartstoffpartikel</i>	82
7.3.3 <i>Zielkonflikt: Geometrische Unschärfe, Vergrößerung und Helligkeit</i>	83
7.3.4 <i>Einfluß relevanter Prozeßparameter auf Partikelbewegungen</i>	84
7.3.5 <i>Vergleich der Versuchsergebnisse mit existierenden Modellansätzen</i>	90
8.0 Zusammenfassung und Ausblick	92
9.0 Literatur	94

1.0 Einleitung

Um in der heutigen Zeit mit einem Produktionsprozeß wettbewerbsfähig zu sein und zu bleiben, müssen ein Maximum an konstanter, hoher Produktqualität erreicht werden, der Fertigungsprozeß ein Optimum an Produktivität leisten, d.h. zeitoptimiert und störungsfrei arbeiten, und die Produktionskosten minimiert werden. Zusammengefaßt beschreiben und bestimmen diese Faktoren die Prozeßqualität. Durch zunehmende Globalisierung der Märkte und steigende Konkurrenz im Wettbewerb ergibt sich somit die übergeordnete Zielsetzung, eine hohe Prozeßqualität zu erreichen. Diese Zielsetzung erfordert es, sowohl die Prozeßabläufe als auch die den Prozeßablauf beeinflussenden Prozeßparameter zu erfassen, zu analysieren und zu bewerten, um eine Prozeßoptimierung hinsichtlich Produktqualität, Prozeßsicherheit und Prozeßproduktivität durch Steuerung bzw. Regelung der Prozeßparameter herbeizuführen. Dabei ist es wichtig, diesen Weg der Prozeßoptimierung schon in der Produktplanungsphase einzuschlagen, um sich einstellende Prozeßfehler schon im Vorfeld aufzudecken, bevor diese sich auf eine Serienfertigung nachteilig auswirken.

Mit dem Hintergrund dieser Problemstellung werden heutzutage erfolgreich Prozeßsimulationen angestellt, anhand derer Prozeßparametervariationen durchgeführt werden können, um Möglichkeiten zur Prozeßoptimierung aufzudecken. Nachteilig wirkt sich hierbei aus, daß Prozeßsimulationen oft aufgrund von Prozeßunkenntnis und -unzugänglichkeit nur mit idealisierten Randbedingungen durchführbar sind, hierdurch nur in einem gewissen Maße den Prozeß realitätsgetreu abbilden können und durch andere Meßverfahren verifiziert bzw. optimiert werden müssen.

Um Prozeßabläufe und die den Prozeß beeinflussenden Prozeßparameter realitätsgetreu erfassen, analysieren und bewerten zu können, sind Prüfmethode bzw. -systeme erforderlich, die prozeßintegriert eingesetzt werden können, um Prozeßzustände und -abläufe on-line zu erfassen. Diese Voraussetzung schränkt die Anwendbarkeit einer großen Anzahl von Prüfmethode stark ein. Kommt erschwerend hinzu, daß der Prozeß aufgrund seiner Eigenart optisch und/oder mechanisch nicht oder nur eingeschränkt zugänglich ist oder erschwerte Prozeßbedingungen, wie z.B. hohe Temperaturen herrschen, bleiben nur wenige Alternativen an einsetzbaren Meßsystemen.

Speziell dynamische Vorgänge in metallischen Schmelzen, beispielsweise beim Gießen oder Oberflächenvergüten mittels Laserstrahldispersieren, stellen eine große Hürde für die Prüftechnik dar. Um derartige Prozesse on-line, d.h. prozeßintegriert zu untersuchen, sind besondere Durchstrahlungstechniken, wie die Mikrofokus- oder Hochgeschwindigkeits-Mikrofokusradioskopie, geeignet, selbst hochdynamische Prozesse bei hoher Ortsauflösung zu analysieren.

Gegenstand dieser Arbeit ist daher mit den Verfahren der Mikrofokus- und Hochgeschwindigkeits-Mikrofokusradioskopie in Kombination mit digitaler Bildverarbeitung erstmals Methoden darzustellen, welche beim Gießprozeß und Laserstrahldispersieren, d.h.

bei Prozessen, bei denen konventionelle Durchstrahlungsmethoden nicht hinreichend eingesetzt werden können, in der Lage sind, die dynamischen Vorgänge in der Schmelze mit hoher Ortsauflösung (Detaildirektvergrößerung) zu erfassen, zu analysieren und zu bewerten, um Möglichkeiten zur Prozeßoptimierung aufzudecken.

8.0 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden radioskopische Untersuchungen mittels eines Mikrofokusradioskopiesystems und rechnergestützter Bildverarbeitung von Radioskopiedaten an verschiedenen praxisbezogenen Prozessen mit schmelzflüssigen Metallen durchgeführt. Dabei wurden, mit dem Ziel der Prozeßanalyse und –optimierung, in den Bereichen Gießen und Laserstrahldispersieren dynamische Vorgänge in schmelzflüssigen Werkstoffphasen radioskopisch erfaßt und analysiert. Die Ausarbeitungen umfassen des weiteren die Darstellung notwendiger Grundlagen zum Prozeßverständnis, einen aktuellen Informationsstand der untersuchten Fertigungsprozesse sowie die Entwicklung und den Einsatz von speziell an die Problemstellungen angepaßter Versuchsprüftechnik und Versuchstandskomponenten.

Im Bereich Aluminiumkokillenguß wurde am Beispiel einer Modellkokille der Erstarrungsprozeß des Gußteils in Grundlagenuntersuchungen hinsichtlich Erstarrungsverhalten und Entstehung von Gießfehlern radioskopisch on-line erfaßt und analysiert. Durch speziell angepaßte Bildverarbeitungsalgorithmen wurden Gießfehler durch Extraktion von Fehlermerkmalen ausgewertet und klassifiziert. Der Einsatz eines Mikrofokusradioskopiesystems in Verbindung mit digitaler Bildverarbeitung hat gezeigt, daß diese Methode sowohl als effektives Werkzeug zur Gießprozeßanalyse in bezug auf die Kokillen- und Gießprozeßauslegung angewandt werden kann als auch ein Potential zur Prozeßoptimierung schwer zugänglicher Prozesse besitzt. Der Hintergrund dabei ist, die on-line Mikrofokusradioskopie zur schnellen Detektion von entstehenden Gußteilfehlern, welche als Indikator für sich ändernde oder ungünstig gewählte Prozeßparameter anzusehen sind, zu nutzen und korrigierend einzugreifen, um eine Prozeßoptimierung zu erzielen. Der grundlagenorientierte Nutzen der on-line Mikrofokusradioskopie wird anhand eines direkten Vergleichs mit Prozeßsimulationen deutlich. Simulationsergebnisse können mittels on-line Mikrofokusradioskopie größtenteils verifiziert werden. Das Verfahren ist des weiteren in der Lage, nicht berücksichtigte Randbedingungen aufzudecken, die zu einer Optimierung der Prozeßsimulationsergebnisse notwendig sind. Mit Ausblick auf die Entwicklungen im Bereich der Computertechnologie können eingesetzte Bildverarbeitungsalgorithmen zukünftig schneller umgesetzt werden, womit Spielraum für umfangreichere, präzisiertere Operationen geschaffen wird.

Die Arbeiten im Bereich Aluminiumsandguß beschreiben Möglichkeiten zur Anwendung der für den Aluminiumkokillenguß in Grundlagenuntersuchungen entwickelten Prüfmethode auf praxisorientierte, industrielle Problemstellungen bei der Prozeßoptimierung von Gießprozessen. Bei diesen Untersuchungen steht im Vordergrund, durch prozeßintegrierte Radioskopie mit digitaler Bildverarbeitung und thermische Analyse das Speisungs- und Erstarrungsverhalten beim Aluminiumsandguß sowie den Prozeßfortschritt in einigen Entwicklungsstufen innerhalb des Entwicklungsprozesses eines modernen Sandgießverfahrens zu erfassen, zu analysieren und zu bewerten. Die hier behandelten Entwicklungsstufen beinhalten zum einen den Einsatz neu entwickelter Filterspeiser sowie

chemisch unterstützte Speisungsvorgänge beim Aluminiumsandguß im Schwerkraftverfahren, zum anderen beinhalten sie den Einsatz keramischer Filter bzw. von Niederdruckverfahren zur Realisierung turbulenzarmer Formfüllungen. Es wurden radioskopische Prozeßanalysen durchgeführt, die sowohl qualitativ als auch quantitativ Aussagen über das Speisungsverhalten verschiedener Filterspeiser und deren Auswirkungen auf die Gußteilqualität liefern. Der Vorgang der chemischen Speisung konnte mittels on-line Mikrofokusradioskopie erstmals erfaßt und analysiert werden, wobei die aus den resultierenden Ergebnissen gewonnenen Erkenntnisse entscheidend zu einer Prozeßoptimierung der chemisch unterstützten Speisung beitragen. Radioskopisch erfaßte Einfüllvorgänge im Filterbereich des Steigrohres beim Niederdruckguß ermöglichen eine quantitative Bewertung der Schmelzflußberuhigung durch keramische Filter. Die Ergebnisse der Radioskopie weisen auf ein hohes Speisungsvermögen der Versuchsanordnung hin, was durch Temperaturmessungen bestätigt werden konnte. Off-line Radioskopieaufnahmen belegen den Prozeßfortschritt bezüglich der Gußteilqualität, die durch eine deutliche Abnahme der Lunkerbildung im kritischen Gußteilbereich aufgrund einer vorliegenden aktiven Speisung mittels permanenten Niederdrucks im gesamten Erstarrungsintervall realisiert wurde.

Die zukünftige Zielsetzung für diesen Bereich wird sein, die einzelnen optimierten Entwicklungsschritte unter Berücksichtigung der hier gesammelten Erkenntnisse zusammenzuführen. Dazu kann auch in Zukunft, wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, die Mikrofokusradioskopie mit digitaler Bildverarbeitung in Kombination mit Temperaturanalysen hilfreiche Informationen zur Prozeßoptimierung liefern und anstehende Entwicklungsschritte effektiver gestalten.

Der Einsatz der Mikrofokusradioskopie in Kombination mit einem Hochgeschwindigkeitskamerasystem ist im letzten Teil der Arbeit am Beispiel des Laserstrahldispersierens von Baustahl und Titan beschrieben. Im Verlauf der Untersuchungen konnten erstmals hochdynamische Strömungsvorgänge im Schmelzbad durch Partikelbewegungen experimentell visualisiert und quantitativ analysiert werden. Dabei konnten insbesondere in Bezug auf vorhandene Simulationsrechnungen abweichende Vorgänge beobachtet und neue Erkenntnisse für den Laserstrahldispersierprozeß gewonnen werden. Die Anwendungsgrenzen der Prüftechnik hinsichtlich der Abbildungsmöglichkeiten schnell ablaufender Prozesse sind beschrieben.

Für die Hochgeschwindigkeits-Mikrofokusradioskopie gilt es, durch verbesserte Lichtempfindlichkeit von Objektiven und Kamera höhere Kontraste zu erzielen. Hinsichtlich der Bildverstärkertechniken sind Verbesserungen mit vorhandenen Komponenten nur schwer zu erzielen, da die Abbildungsgrenzen durch physikalische Eigenschaften des Phosphorausgangsbildschirms vorgegeben sind.

Die nachgewiesene Eignung der Hochgeschwindigkeits-Mikrofokusradioskopie zur Prozeßobservierung, -kontrolle und -analyse beim Laserstrahldispersieren weist deutlich

darauf hin, diese Methode auch in anderen Bereichen, wie z.B. beim Schmelzen, Schweißen und Löten mittels Lasertechnologie erfolgreich zur Prozeßdiagnose einzusetzen.