

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 815/2008
(22) Anmeldetag: 21.05.2008
(45) Veröffentlicht am: 15.07.2011

(51) Int. Cl. : **B22D 11/22** (2006.01)
B22D 11/16 (2006.01)
G06F 17/50 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
WO 2001/091943A1
WO 2007/014831A1
DE 19612420A1

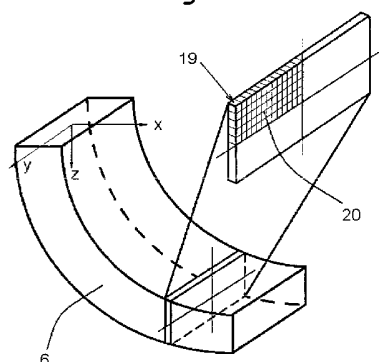
(73) Patentinhaber:
SIEMENS VAI METALS TECHNOLOGIES
GMBH & CO
A-4031 LINZ (AT)

(72) Erfinder:
DITTENBERGER KURT DR.
LEONDING (AT)

(54) VERFAHREN ZUM STRANGGIEßEN EINES METALLSTRANGS

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Stranggießen eines Metallstrangs in einer Stranggießanlage, wobei ein Strang mit einem, von einer Strangschale eingeschlossenen, flüssigen Kern aus einer gekühlten Durchlaufkokille ausgezogen, in einer der Durchlaufkokille nachgeordneten Strangstützeinrichtung gestützt und mit Kühlmittel gekühlt wird, wobei thermodynamische Zustandsänderungen des gesamten Strangs in einem mathematischen Simulationsmodell mitberechnet werden. Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zu schaffen, mit welchem die Genauigkeit der Simulation der thermodynamischen Zustandsänderungen des gesamten Strangs erhöht werden kann und in Verbindung mit der Strangkühlung die Produktqualität des Metallstrangs und die Produktionsleistung des Stranggießprozesses verbessert werden kann. Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren gelöst, bei dem im mathematischen Simulationsmodell eine dreidimensionale Wärmeleitungsgleichung in Echtzeit numerisch gelöst wird und die Kühlung des Strangs unter Berücksichtigung der errechneten Zustandsänderungen eingestellt wird.

Fig. 2



Beschreibung

VERFAHREN ZUM STRANGGIEßEN EINES METALLSTRANGS

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Stranggießen eines Metallstrangs.

[0002] Konkret betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Stranggießen eines Metallstrangs, insbesondere eines Stahlstrangs, in einer Stranggießanlage, wobei ein Strang mit einem, von einer Strangschale eingeschlossenen, flüssigen Kern aus einer gekühlten Durchlaufkokille ausgezogen, in einer der Durchlaufkokille nachgeordneten Strangstützeinrichtung gestützt und mit Kühlmittel gekühlt wird, wobei thermodynamische Zustandsänderungen des gesamten Strangs in einem mathematischen Simulationsmodell, unter Berücksichtigung der physikalischen Parameter des Metalls, der Dicke des Strangs und der ständig gemessenen Auszugs geschwindigkeit mitberechnet werden.

[0003] Aus der DE 4417808 A1 ist ein Verfahren zum Stranggießen eines Metallstrangs bekannt, bei dem ein Strang mit von einer Strangschale eingeschlossenem flüssigen Kern aus einer gekühlten Kokille ausgezogen, anschließend in einer Strangstützeinrichtung gestützt und mit Kühlmittel gekühlt wird. Die im Zuge des Stranggussprozesses passierenden Zustandsänderungen werden mittels eines mathematischen Simulationsmodells, beinhaltend die zweidimensionale Wärmeleitungsgleichung, für den gesamten Strang in Echtzeit mitberechnet und die Kühlung des Strangs in Abhängigkeit der berechneten thermodynamischen Zustandsänderungen eingestellt.

[0004] Aufgrund der Zweidimensionalität der verwendeten Wärmeleitungsgleichung war es bislang nicht möglich, die Wärmeleitung und die damit verbundenen Zustandsänderungen in allen Richtungen (der Strangdicke, der Strangbreite und der Strangauszugsrichtung) des Metallstrangs zu berechnen und den Temperaturverlauf in Abhängigkeit der berechneten Zustandsänderungen mittels der Strangkühlung gezielt einzustellen. Außerdem kam es aufgrund von - im Simulationsmodell nicht berücksichtigten - thermodynamischen Effekten zu Abweichungen zwischen dem berechneten und tatsächlichen Durcherstarrungspunkt.

[0005] Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren der eingangs genannten Art zu schaffen, mit welchem die Genauigkeit der Simulation der thermodynamischen Zustandsänderungen des gesamten Strangs weiter erhöht werden kann und in Verbindung mit der Kühlung die Produktqualität des Metallstrangs und die Produktionsleistung des Stranggießprozesses verbessert werden kann.

[0006] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren der eingangs genannten Art gelöst, bei dem im mathematischen Simulationsmodell eine dreidimensionale Wärmeleitungsgleichung in Echtzeit numerisch gelöst wird und die Kühlung des Strangs unter Berücksichtigung der errechneten Zustandsänderungen eingestellt wird.

[0007] Mittels des Verfahrens aus der DE 4417808 A1 ist es möglich, thermodynamische Zustandsänderungen in Abhängigkeit der zweidimensionalen Wärmeleitung, in Echtzeit zu berechnen und mittels der Strangkühlung den Temperaturverlauf des Strangs zu beeinflussen. Nach dem erfindungsgemäßen Verfahren ist es möglich, thermodynamische Zustandsänderungen mittels einer nichtlinearen, instationären Wärmeleitungsgleichung in Abhängigkeit der dreidimensionalen Wärmeleitung, nämlich in Strangdickenrichtung, in Strangbreitenrichtung und in Stranglängsrichtung, d.h. in der Auszugsrichtung des Strangs, in Echtzeit zu berechnen und mittels der Strangkühlung gezielt zu beeinflussen. Hierdurch können die thermodynamischen Zustandsänderungen mit höherer Genauigkeit berechnet werden und mittels einer darauf abgestimmten Strangkühlung ganz gezielt beeinflusst werden. Im mathematischen Simulationsmodell wird der Strang in einzelne Volumenelemente zerteilt, d.h. sog. diskretisiert, wobei jedes diskrete Volumenelement eine Erstreckung in Stranglängsrichtung, in Strangdickenrichtung und in Strangbreitenrichtung aufweist. Mittels dieser Diskretisierung können einzelne Düsen der Strangkühlung einem oder mehreren diskreten Volumenelementen des Strangs zugeordnet werden und dadurch erstens die thermodynamischen Zustandsänderungen in diesen Volumen-

elementen unter Berücksichtigung der Wärmeleitung in allen räumlichen Dimensionen und der durch die Strangkühlung abgeführten Wärmemenge mit hoher Genauigkeit bestimmt werden, und zweitens, mittels dieser Düsen die thermodynamischen Eigenschaften des Strangs ganz gezielt und mit hoher Effizienz beeinflusst werden.

[0008] In einer besonders vorteilhaften Ausprägung, wird im mathematischen Simulationsmodell des erfindungsgemäßen Verfahrens die dreidimensionale Wärmeleitungsgleichung unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Dichteänderung des Metallstrangs numerisch gelöst. Dem Fachmann ist bekannt, dass die Dichteänderung von Metall in Abhängigkeit der Temperatur signifikante Ausmaße annehmen kann. So erhöht sich beispielsweise beim Stranggussprozess die Dichte von Stahl von ca. 7000 kg/m^3 bei 1550°C (Temperatur der Schmelze im Gießverteiler) auf ca. 7800 kg/m^3 bei 300°C (durcherstarrter Strang). Die Dichteänderungen sind beim Stranggussprozess in Verbindung mit der Wärmeleitungsgleichung auch bei der Bestimmung des Durcherstarrungspunkts relevant. Als Durcherstarrungspunkt wird jener Punkt in Strangauszugsrichtung bezeichnet, ab dem der Metallstrang vollkommen durcherstarrt ist, d.h. der Metallstrang über keinen flüssigen Kern mehr verfügt. Eine möglichst genaue Berechnung des Durcherstarrungspunkts ist in jedem Fall äußerst vorteilhaft. Wird die Lage des Durcherstarrungspunkts unterschätzt, d.h. ist in Auszugsrichtung der berechnete Punkt weniger weit von der Kokille entfernt als der tatsächliche Punkt, so kann dies zu sehr gefährlichen Gießsituationen (z.B. auch einen Strangdurchbruch) führen. Auf der anderen Seite wird die zulässige Gießgeschwindigkeit bei einer Überschätzung des Durcherstarrungspunkts in unnötiger Weise beschränkt, was wiederum die Produktivität der Anlage verschlechtern würde.

[0009] Eine weitere, besonders vorteilhafte Ausprägung des erfindungsgemäßen Verfahrens lässt sich dann erzielen, wenn bei der numerischen Lösung der Wärmeleitungsgleichung unter Berücksichtigung temperaturabhängiger Dichteänderungen des Metallstrangs approximierte Gleichungen für die Enthalpie verwendet werden, welche für den gesamten Strang die exakte Masse und die exakte Enthalpie aufweisen. Es soll an dieser Stelle bemerkt werden, dass die exakte dreidimensionale, nichtlineare und instationäre Wärmeleitungsgleichung unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Dichteänderung bis heute noch ungelöst ist. Die heute verwendeten Wärmeleitungsgleichungen ohne Berücksichtigung der temperaturabhängigen Dichteänderung sind nur grobe Näherungen der exakten Gleichung und deren Lösungen können deutlich von der exakten Lösung abweichen. Durch die Verwendung von approximierte Gleichungen für die Enthalpie mit global - d.h. wenn der gesamte Strang betrachtet wird - der exakten Masse und der exakten Enthalpie ist jedoch sichergestellt, dass diese wesentlichen thermodynamischen Zustandsgrößen den exakten Werten entsprechen.

[0010] Das erfindungsgemäße Verfahren lässt sich besonders günstig ausführen, wenn zur Lösung der Wärmeleitungsgleichung im mathematischen Simulationsmodell entweder ein Finite-Volumen-Verfahren oder ein Finite-Elemente-Verfahren angewendet wird. Die Wärmeleitungsgleichung ist eine parabolische, partielle Differentialgleichung, die mit Standardmethoden der numerischen Mathematik, insbesondere dem Finite-Volumen-Verfahren oder Finite-Elemente-Verfahren, gelöst werden kann (siehe Kapitel 19: Numerische Mathematik von I.N. Bronstein, K. A. Semendjajew, G. Musiol, H. Mühlig: Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch, 6. Auflage, 2005).

[0011] In besonders günstiger Weise wird das erfindungsgemäße Verfahren dann ausgeführt, wenn die thermodynamischen Zustandsänderungen aufgrund der räumlichen Symmetrie nur für ein Viertel des Strangquerschnitts berechnet werden. Diese Vereinfachung kann aufgrund der räumlichen Symmetrie des Strangquerschnitts und der zeitlich veränderlichen Randbedingungen ohne Genauigkeitsverlust gemacht werden und ermöglicht es, dass die dreidimensionale Wärmeleitungsgleichung mit hoher Genauigkeit auch von relativ leistungsschwachen Prozessrechnern gelöst werden kann.

[0012] Das erfindungsgemäße Verfahren kann uneingeschränkt beim Gießen von Metallsträngen mit Knüppel-, Vorblock-, Brammen- oder Dünnbrammenquerschnitt beliebiger Abmessungen verwendet werden, um die Qualität der gegossenen Metallstränge zu verbessern.

[0013] Weitere Vorteile und Merkmale der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung nicht einschränkender Ausführungsbeispiele, wobei auf die folgenden Figuren Bezug genommen wird, die Folgendes zeigen:

[0014] Fig. 1 eine Stranggussanlage in schematischer Seitenansicht

[0015] Fig. 2 eine schematische Darstellung des diskretisierten Metallstrangs

[0016] Fig. 3 ein Vergleich von Lösungen unterschiedlicher Formulierungen von Wärmeleitungsgleichungen

[0017] Eine gekühlte Kokille 1 wird mit flüssigem Stahl 2, der aus einem Zwischengefäß 3 zugeführt wird, gespeist. Der sich in der Kokille 1 bildende, einen flüssigen Kern 4 und zunächst nur eine dünne Strangschale 5 aufweisende, Strang 6 wird über eine bogenförmig ausgebildete Strangstützeinrichtung 7, die mit Stützrollen 8 versehen ist und den Strang an der Ober- und an der Unterseite stützt, in die Horizontale umgeleitet, wo er nach der Durcherstarrung entweder zerteilt oder als ein kontinuierlicher Strang weitertransportiert wird. Zur Kühlung des Strangs 6 sind entlang der Strangstützeinrichtung 7 Kühlmittel zuführende Düsen 10 vorgesehen, von denen in der Zeichnung nur solche an der Strangoberseite am Beginn der Strangstützeinrichtung 7 eingezeichnet sind. Dabei sind ein oder mehrere Düsen 10 an jeweils eine Zuleitung 11 angeschlossen. Die durch die Düsen auf den Strang aufgebrachte Kühlmittelmenge kann mittels eines kontinuierlich einstellbaren Ventils 12 verändert werden, welchem eine Durchflussmesseinrichtung 13 nachgeordnet ist. Jedes Ventil 12 ist über ein Stellglied 14 verstellbar, dass über ein, von einem zentralen Prozessrechner 15 angesteuertes, Regelglied 16 betätigbar ist. Jede Durchflussmesseinrichtung ist über eine Eingabeeinheit 17 an den Prozessrechner 15 angekoppelt, welcher wiederum alle Regelglieder 16 über eine Ausgabeeinheit 18 ansteuert. In die Eingabeeinheit 17 des Prozessrechners 15 können beispielsweise noch die physikalischen Parameter des zu vergießenden Metalls, im vorliegenden Fall des Stahls 2, nämlich die temperaturabhängigen Werte der Dichte, der spezifischen Wärmekapazität und der Wärmeleitfähigkeit, weiters das durchflussabhängige Sprühbild der ortsabhängig angeordneten Düsen 10, die ortsabhängige Rollenteilung 9, die gegebenenfalls ortsabhängige Strangdicke, die Strangbreite und die ständig gemessene Gießgeschwindigkeit der Stranggussanlage eingegeben werden.

[0018] Erfindungsgemäß wird der Strang 6 an bestimmten, entweder fixen oder veränderlichen, Positionen der Strangstützeinrichtung 7 geregelt abgekühlt. Die Regelung der Strangkühlung erfolgt unter Berücksichtigung der thermodynamischen Zustandsänderungen des gesamten Strangs 6 durch das Lösen in Echtzeit einer dreidimensionalen Wärmeleitungsgleichung mit Hilfe des Prozessrechners 15.

[0019] Eine dreidimensionale, nichtlineare und instationäre Wärmeleitungsgleichung in einer Enthalpie Formulierung lautet beispielsweise

$$\rho \left(\frac{\partial E_{\text{mass}}(\vec{x}, t)}{\partial t} + v_{\text{cast}}(t) \frac{\partial E_{\text{mass}}(\vec{x}, t)}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 u(\vec{x}, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(\vec{x}, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u(\vec{x}, t)}{\partial z^2}$$

wobei

t	Zeit in [s]
x	die Koordinate in Strangdickenrichtung in [m]
y	die Koordinate in Strangbreitenrichtung in [m]
z	die Koordinate in Auszugsrichtung bzw. der Stranglängsachse in [m]

$\frac{\partial}{\partial t}$ partielle Ableitung nach der Zeit t

$\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}$ partielle Ableitungen nach dem Ort x, y, z

$\vec{x}$ Ortsvektor in einem rechtwinkligen Koordinatensystem in [m]

ρ Dichte in [kg/m³]

$E_{mass}(\vec{x}, t)$ Massenbezogene Enthalpie an der Stelle x zur Zeit t in [J/kg]

ξ Dimensionslose Laufvariable

$$u(\vec{x}, t) = \int_{T_{ref}}^{T(\vec{x}, t)} \lambda(\xi) \cdot d\xi$$

$v_{cast}(t)$ Auszugsgeschwindigkeit des Strangs zur Zeit t in [m/s]

[0020] Bei dieser Wärmeleitungsgleichung bleiben temperaturabhängige Dichteänderungen des Strangs 6 unberücksichtigt. Da die Dichte von Stahl 2 von 7000 kg/m³ bei 1550°C auf 7800 kg/m³ bei 300°C ansteigt, führt diese Vereinfachung zu Ungenauigkeiten in der Berechnung der thermodynamischen Zustandsänderungen. Es hat sich herausgestellt, dass bei dieser Wärmeleitungsgleichung der Durcherstarrungspunkt unterschätzt wird, d.h. dass der tatsächliche Durcherstarrungspunkt weiter von der Kokille 1 entfernt ist als der berechnete Durcherstarrungspunkt. Um nachteilige und gegebenenfalls sogar gefährliche Gießsituationen zu vermeiden, ist es notwendig, einen Dichtewert ρ im Bereich der maximalen Dichte des Stahls 2 zu verwenden, was in weiterer Folge die max. zulässige Gießgeschwindigkeit signifikant reduziert.

[0021] Eine zweite Formulierung einer nichtlinearen, dreidimensionalen und instationären Wärmeleitungsgleichung lautet

$$\rho(T(\vec{x}, t)) \left(\frac{\partial E_{mass}(\vec{x}, t)}{\partial t} + v_{cast}(t) \frac{\partial E_{mass}(\vec{x}, t)}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 u(\vec{x}, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(\vec{x}, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u(\vec{x}, t)}{\partial z^2}$$

wobei

$T(\vec{x}, t)$ Temperatur an der Stelle x zur Zeit t in [° K]

$\rho(T(\vec{x}, t))$ Dichte des Metallstrangs bei der Temperatur T in [kg/m³]

[0022] Diese Formulierung der Wärmeleitungsgleichung ist global, d.h. wenn der gesamte Strang betrachtet wird, massenrichtig, jedoch unrichtig bzgl. der Enthalpie. Es hat sich gezeigt, dass bei dieser Wärmeleitungsgleichung der Durcherstarrungspunkt überschätzt wird, d.h. dass der tatsächliche Durcherstarrungspunkt weniger weit von der Kokille entfernt ist als der berechnete Durcherstarrungspunkt. Somit ist die Verwendung dieser Gleichung zwar bzgl. etwaiger nachteiliger Gießsituationen unproblematisch, jedoch wird die max. zulässige Gießgeschwindigkeit unnötigerweise beschränkt, was sich in einer reduzierten Produktivität der Anlage auswirkt.

[0023] Vorteilhafterweise verwendet man die Wärmeleitungsgleichung

$$\left(\frac{\partial E_{trans}(\vec{x}, t)}{\partial t} + v_{cast}(t) \frac{\partial E_{trans}(\vec{x}, t)}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 u(\vec{x}, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(\vec{x}, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u(\vec{x}, t)}{\partial z^2}$$

wobei

$E_{trans}(\vec{x}, t)$ Transformierte massenbezogene Enthalpie an der Stelle x zur Zeit t

[0024] Dabei werden zwei Ansätze für eine, bzgl. der Masse und der Enthalpie global richtige, transformierte Enthalpie ($E_{trans}(\vec{x}, t)$) benützt. Die thermodynamischen Verhältnisse im Strang 6 ändern sich am Durcherstarrungspunkt 19 signifikant, da der Strang 6 - in Gießrichtung betrachtet - oberhalb des Durcherstarrungspunkts einen flüssigen Kern 4 aufweist, welcher mit dem flüssigen Stahl 2 der Kokille 1 in Verbindung steht. Der ferrostatische Druck in diesem Bereich

presst die bereits erstarrte Strangschale 5 gegen die Rollen 8 der Strangstützeinrichtung 7, wodurch in diesem Bereich die Strangschumpfung aufgrund der temperaturabhängigen Dichteänderung des Stahls 2 durch nachströmenden, flüssigen Stahl 2 kompensiert wird. Unterhalb des Durcherstarrungspunkts 19 findet eine derartige Kompensation nicht mehr statt.

[0025] Oberhalb des Durcherstarrungspunkts 19 lautet der Ansatz

$$E_{trans}(\vec{x}, t) = \int_{T_{ref}}^{T(\vec{x}, t)} [\rho(\xi) \cdot \dot{E}_{mass}(\xi) - \dot{\rho}(\xi)(E_{mass}(T_{tund}) - E_{mass}(\xi))] d\xi.$$

[0026] Hingegen verwendet man unterhalb des Durcherstarrungspunkts 19 folgenden Ansatz

$$E_{trans}(\vec{x}, t) = \int_{T_{ref}}^{T(\vec{x}, t)} \rho(\xi) \cdot \dot{E}_{mass}(\xi) \cdot d\xi$$

Hierin bedeuten

T_{ref} eine beliebige, aber konstante Referenztemperatur (überlicherweise 25 °C)

T_{tund} Temperatur des Metalls im Gießspiegel in [° K]

$\dot{E}_{mass}(\vec{x}, t)$ Zeitliche Ableitung der massenbezogenen Enthalpie

[0027] Die Wärmeleitungsgleichung wird auf Lagrange'sche Koordinaten $\vec{x}_{Lag}$ transformiert, d.h. von einem mit der Strangauszugsbewegung mitbewegten Beobachter betrachtet. Die Transformation lautet

$$CastLg(t) = \int_{start} v_{cast}(\zeta) \cdot d\zeta$$

$$\vec{x}_{Lag}(t) = \begin{pmatrix} x \\ y \\ CastLg(t) - z \end{pmatrix}$$

wobei

t_{start} Zeitpunkt der Entstehung des diskreten Volumenelements in der Kokille in [s]

[0028] Die Wärmeleitungsgleichung in Lagrange'schen Koordinaten lautet dann

$$\frac{\partial E_{trans}(\vec{x}_{Lag}(t))}{\partial t} = \frac{\partial^2 u(\vec{x}_{Lag}(t))}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(\vec{x}_{Lag}(t))}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u(\vec{x}_{Lag}(t))}{\partial z^2}$$

[0029] Diese Wärmeleitungsgleichung wird mittels des Verfahrens der Finiten-Volumen vom Prozessrechner 15 in Echtzeit gelöst. Dieses Standardverfahren der numerischen Mathematik ist dem Fachmann bekannt und arbeitet mit diskreten Volumenelementen des Strangs 6. Für jedes Volumenelement 20 ist daher die einfache, im mit v_{cast} bewegten, elementfesten Koordinatensystem beschriebene dreidimensionale Wärmeleitungsgleichung zu lösen. Dies wird für eine Vielzahl von Volumenelementen 20 periodisch durchgeführt, wodurch sich das zeitveränderliche Temperaturfeld des gesamten Strangs 6 ergibt. Aus Fig. 2 ist ersichtlich, dass der Strang 6 in diskrete Volumenelemente 19 von beispielsweise 10 cm Kantenlänge eingeteilt wird. Die Volumenelemente 19 werden in der Kokille erzeugt und entsprechend der Gießgeschwindigkeit durch die Stranggussanlage verfolgt.

[0030] Wie in Fig. 2 dargestellt, liegt die Strangdickenachse x und die Strangbreitenachse y symmetrisch zu den Rändern des erstarrenden Strangs 6. Aufgrund dieser räumlichen Symmetrie

rie in Strangbreiten- und Strangdickenrichtung ist es vorteilhaft, die thermodynamischen Zustandsänderungen nur in einem Quadranten 20, d.h. einem Viertel, des Strangquerschnitts zu berechnen.

[0031] Zur Lösung der Wärmeleitungsgleichung werden allerdings noch die Anfangs- und die -zufolge der Bewegung der Volumenelemente durch die Kokille sowie durch verschiedene Kühlzonen - zeitlich veränderlichen Randbedingungen benötigt.

[0032] Die Anfangsbedingung für ein neu erzeugtes Volumenelement lautet

$$T(\vec{x}_{Lag}(t_{start})) = T_{tund}$$

[0033] Die Randbedingung lautet allgemein

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{Oberfläche}} = q(t)$$

wobei

$$\lambda(T) \quad \text{Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit in } \left[\frac{W}{mK} \right]$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{Oberfläche}} \quad \text{Temperaturgradient normal zur Oberfläche}$$

$$q(t) \quad \text{Spezifischer Wärmestrom zur Zeit } t$$

[0034] Um den Wärmestrom $q(t)$ zu modellieren, wird innerhalb der gekühlten Kokille 1 folgender Ansatz verwendet

$$q(t) = \alpha_{mold}(T_{surf}(t)) \cdot (T_{surf}(t) - T_{mold})$$

[0035] Außerhalb der Kokille ist

$$q(t) = \alpha_{water}(sw(t)) \cdot (T_{surf}(t) - T_{water}) + \alpha_{roll}(t) \cdot (T_{surf}(t) - T_{roll}) + \underbrace{\sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{surf}(t)^4 - T_{amb}^4)}_{\text{radiation}}$$

wobei

$$\alpha_{mold}(T_{surf}(t)) \quad \text{Wärmeabfuhrfunktion der Kokille}$$

$$\alpha_{water}(sw(t)) \quad \text{Wärmeabfuhrfunktion der Strangkühlung}$$

$$sw(t) \quad \text{Kühlwassermenge der Strangkühlung}$$

$$\alpha_{roll}(t) \quad \text{Wärmeabfuhrfunktion der Stützrollen}$$

$$\sigma \quad \text{Stefan-Boltzmann Konstante}$$

$$\varepsilon \quad \text{der Emissionsgrad}$$

$$T_{surf}(t) \quad \text{Oberflächentemperatur des Strangs 6}$$

$$T_{amb} \quad \text{Umgebungstemperatur}$$

[0036] Da die dreidimensionale Wärmeleitungsgleichung bis heute noch ungelöst ist, soll die hohe Genauigkeit der erfindungsgemäßen Formulierung der Wärmeleitungsgleichung mit einer transformierten Enthalpie E_{trans} anhand eines eindimensionalen Beispiels überprüft werden. Die exakte Lösung der Wärmeleitungsgleichung unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Dichteänderung (durchgezogene Linie) ist im eindimensionalen Fall bekannt und wird in Fig. 3 mit einer massenrichtigen Formulierung (strichlierte Linie) und einer massen- und enthalpierich-

tigen Formulierung (gepunktete, durchgezogene Linie) verglichen. In Fig. 3 ist auf der Ordinate der Abstand in Strangauszugsrichtung von der Kokille und auf der Abszisse die Dicke eines Metallstrangs in Strangdickenrichtung aufgetragen. Wie in Fig. 3 zu sehen ist, ist bei einer massen- und enthalpierichtigen Formulierung der Wärmeleitungsgleichung der tatsächliche Durcherstarrungspunkt geringfügig weiter von der Kokille entfernt als der berechnete Durcherstarrungspunkt, d.h. der Durcherstarrungspunkt wird geringfügig überschätzt. Im Vergleich dazu, wird der Durcherstarrungspunkt bei einer massenrichtigen Formulierung der Wärmeleitungsgleichung signifikant unterschätzt, was zu kritischen Situationen beim Stranggussprozess führen kann.

BEZUGSZEICHENLISTE

- 1 Kokille
- 2 Stahl
- 3 Zumischgefäß
- 4 Flüssiger Kern des Strangs
- 5 Strangschale
- 6 Strang
- 7 Strangstützeinrichtung
- 8 Stützrollen
- 9 Rollenteilung
- 10 Kühldüsen
- 11 Zuleitung Kühlmittel
- 12 Ventil
- 13 Durchflussmesseinrichtung
- 14 Stellglied
- 15 Prozessrechner
- 16 Regelglied
- 17 Eingabeeinheit
- 18 Ausgabeeinheit
- 19 Diskretes Volumenelement
- 20 Quadrant des Strangs

Patentansprüche

1. Verfahren zum Stranggießen eines Metallstrangs, insbesondere eines Stahlstrangs, in einer Stranggießanlage, wobei ein Strang mit einem, von einer Strangschale eingeschlossenen, flüssigen Kern aus einer gekühlten Durchlaufkokille ausgezogen, in einer der Durchlaufkokille nachgeordneten Strangstützeinrichtung gestützt und mit Kühlmittel gekühlt wird, wobei thermodynamische Zustandsänderungen des gesamten Strangs in einem mathematischen Simulationsmodell unter Berücksichtigung der physikalischen Parameter des Metalls, der Dicke des Strangs und der ständig gemessenen Auszugsgeschwindigkeit mitberechnet werden, **dadurch gekennzeichnet**, dass im mathematischen Simulationsmodell eine dreidimensionale Wärmeleitungsgleichung unter Berücksichtigung temperaturabhängiger Dichteänderungen des Metallstrangs in Echtzeit numerisch gelöst wird und die Kühlung des Strangs unter Berücksichtigung der errechneten Zustandsänderungen eingestellt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei der numerischen Lösung der Wärmeleitungsgleichung unter Berücksichtigung temperaturabhängiger Dichteänderungen des Metallstrangs approximiert Gleichungen für die Enthalpie verwendet werden, welche für den gesamten Strang die exakte Masse und die exakte Enthalpie aufweisen.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Wärmeleitungsgleichung durch ein Finite-Volumen-Verfahren oder durch ein Finite-Elemente-Verfahren numerisch gelöst wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die thermodynamischen Zustandsänderungen aufgrund der räumlichen Symmetrie nur für ein Viertel des Strangquerschnitts berechnet werden.

Hierzu 2 Blatt Zeichnungen

Fig. 1

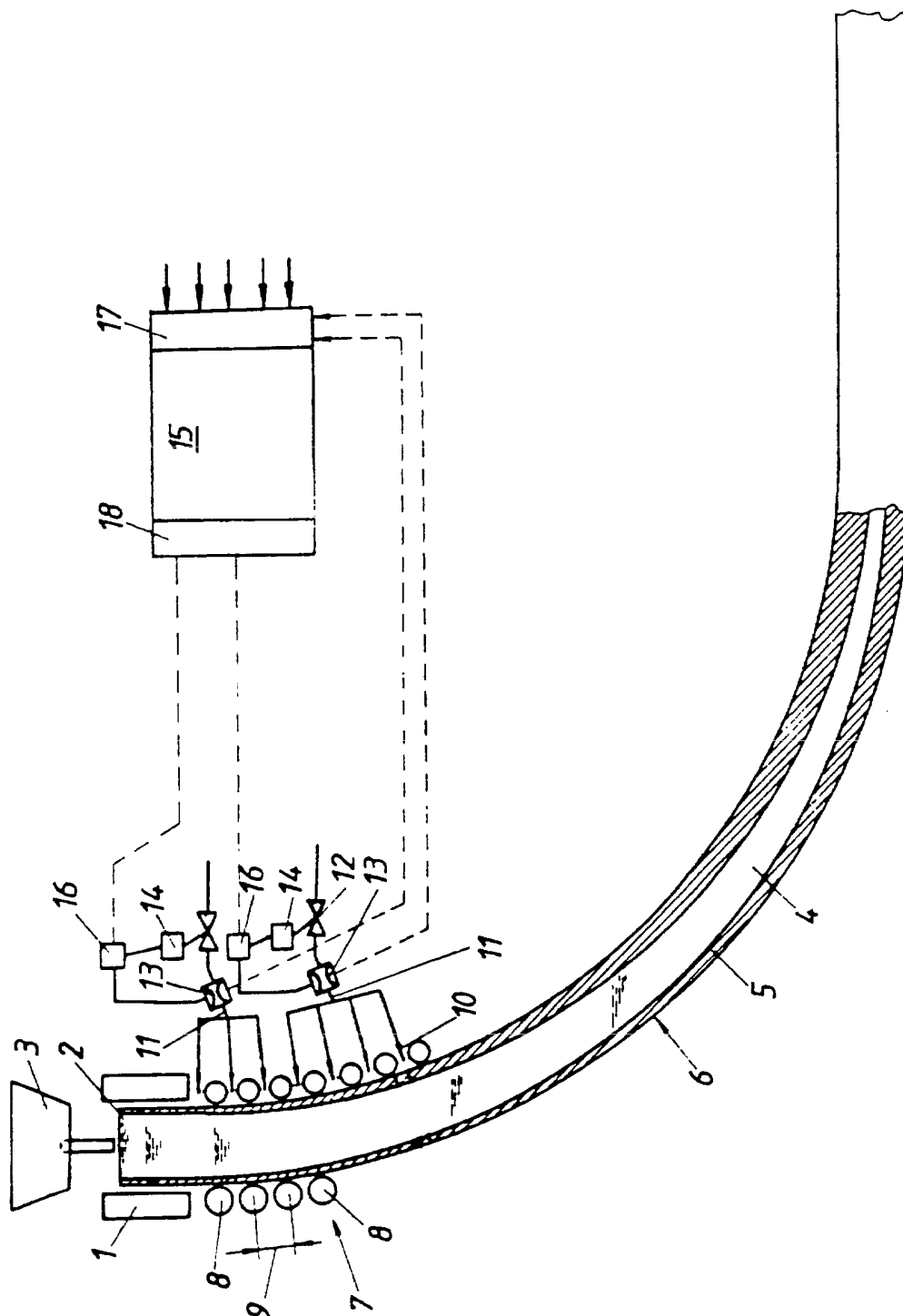


Fig. 2

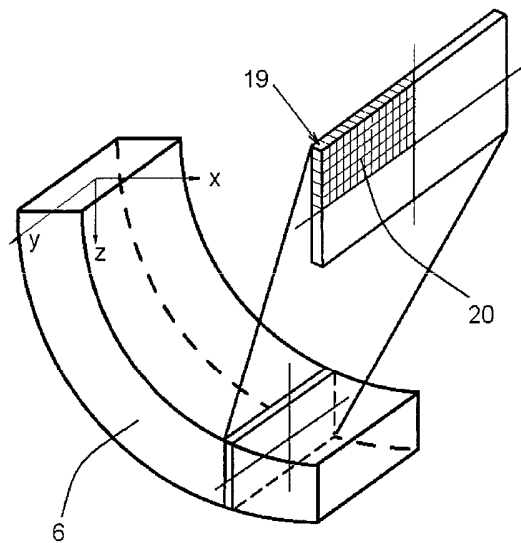


Fig. 3

Isothermen bei verschiedenen Algorithmen

