(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 2 279 053 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
26.08.2015 Patentblatt 2015/35

(21) Anmeldenummer: **09749695.4**

(22) Anmeldetag: **22.04.2009**

(51) Int Cl.:
B22D 11/22 *(2006.01)*

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2009/054776

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2009/141205 (26.11.2009 Gazette 2009/48)

(54) **VERFAHREN ZUM STRANGGIESSEN EINES METALLSTRANGS**

METHOD FOR THE CONTINUOUS CASTING OF A METAL STRAND

PROCÉDÉ DE COULÉE CONTINUE D'UNE BARRE MÉTALLIQUE

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO SE SI SK TR

(30) Priorität: **21.05.2008 AT 8152008**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
02.02.2011 Patentblatt 2011/05

(73) Patentinhaber: **Primetals Technologies Austria GmbH**
4031 Linz (AT)

(72) Erfinder: **DITTENBERGER, Kurt**
A-4060 Leonding (AT)

(74) Vertreter: **Metals@Linz**
c/o Siemens AG
Postfach 22 16 34
80560 München (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A- 0 997 203 DE-A1- 4 417 808

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

EP 2 279 053 B1

Printed by Jouve, 75001 PARIS (FR)

Beschreibung

[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 Auszugsgeschwindigkeit 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] Aus der EP 0 997 203 A1 ist ein Verfahren zur Regelung einer Kühlstrecke bekannt, wobei mittels eines mathematischen Prozessmodells der Temperaturverlauf über die Länge des Bands berechnet wird. Im Anschluss daran wird die Kühlstrecke unter Berücksichtigung eines Referenzternperaturverlaufs und des berechneten Temperaturverlaufs geregelt.

[0006] 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.

[0007] 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.

[0008] 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, dh. 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 Volumenelementen 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.

[0009] 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, dh. 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, dh. 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.

[0010] 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 approximierten Gleichungen für die Enthalpie mit global - dh. 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.

[0011] 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).

[0012] 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.

[0013] 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.

[0014] 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:

Fig. 1 eine Stranggussanlage in schematischer Seitenansicht
Fig. 2 eine schematische Darstellung des diskretisierten Metallstrangs
Fig. 3 ein Vergleich von Lösungen unterschiedlicher Formulierungen von Wärmeleitungsgleichungen

[0015] 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 Eingebeeinheit 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.

[0016] Erfindungsgemäß wird der Strangs 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.

[0017] Eine dreidimensionale, nichtlineare und instationäre Wärmeleitungsgleichung in einer Enthalpie Formulierung lautet beispielsweise

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

wobei

t 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 rechtwinkeligen Koordinatensystem in [m]

ρ Dichte in [kg/m^3]

$E_{mass}(\vec{x},t)$ 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]

[0018] Bei dieser Wärmeleitungsgleichung bleiben temperaturabhängige Dichteänderungen des Strangs 6 unberücksichtigt. Da die Dichte von Stahl 2 von 7000 kg/m^3 bei 1550 °C auf 7800 kg/m^3 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, dh. 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 p im Bereich der maximalen Dichte des Stahls 2 zu verwenden, was in weiterer Folge die max. zulässige Gießgeschwindigkeit signifikant reduziert.

[0019] 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/m^3]

[0020] 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, dh. 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.

[0021] 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

[0022] 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 Strangschrumpfung 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.

[0023] Oberhalb des Durcherstarrungspunkts 19 lautet der Ansatz

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

Hingegen verwendet man unterhalb des Durcherstarrungspunkts 19 folgenden Ansatz

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

Hierin bedeuten

T_{ref} eine beliebige, aber konstante Referenztemperatur (üblicherweise 25 °C)
T_{tund} Temperatur des Metalls im Gießspiegel in [° K]
$\dot{E}_{mass}(\vec{x},t)$ Zeitliche Ableitung der massenbezogenen Enthalpie

[0024] Die Wärmeleitungsgleichung wird auf Lagrange'sche Koordinaten $\vec{x}_{Lag}$ transformiert, d.h. von einem mit der Strangauszugsbewegung mitbewegten Beobachter betrachtet. Die Transformation lautet

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

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

wobei

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

[0025] Die Wärmeleitungsgleichung in Lagrange'schen Koordinaten lautet dann

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

[0026] 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.

[0027] 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 in Strangbreiten- und Strangdickenrichtung ist es vorteilhaft, die thermodynamischen Zustandsänderungen nur in einem Quadranten 20, d.h. einem Viertel, des Strangquerschnitts zu berechnen.

[0028] 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.

[0029] Die Anfangsbedingung für ein neu erzeugtes Volumenelement lautet

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

[0030] Die Randbedingung lautet allgemein

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

wobei

$\lambda(T)$ Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit in $[\frac{W}{m\,K}]$

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

$q(t)$ Spezifischer Wärmestrom zur Zeit t

[0031] Um den Wärmestrom q(t) zu modellieren, wird innerhalb der gekühlten Kokille 1 folgender Ansatz verwendet

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

[0032] Außerhalb der Kokille ist

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

wobei

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

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

$sw(t)$ Kühlwassermenge der Strangkühlung

$a_{roll}(t)$ Wärmeabfuhrfunktion der Stützrollen

σ Stefan-Boltzmann Konstante

ε der Emissionsgrad

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

T_{amb} Umgebungstemperatur

[0033] 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 enthalpierichtigen 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 Strandickenrichtung 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, dh. 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

[0034]

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 (6) in einer Stranggießanlage, wobei der Metallstrang (6) mit einem, von einer Strangschale (5) eingeschlossenen, flüssigen Kern (4) aus einer gekühlten Durchlaufkokille (1) ausgezogen, in einer der Durchlaufkokille (1) nachgeordneten Strangstützeinrichtung (7) gestützt und mit Kühlmittel gekühlt wird, wobei thermodynamische Zustandsänderungen des gesamten Metallstrangs (6) in einem mathematischen Simulationsmodell unter Berücksichtigung der physikalischen Parameter des Metalls, der Dicke des Metallstrangs (6) und der ständig gemessenen Auszugsgeschwindigkeit mitberechnet werden, **dadurch gekennzeichnet, dass** im mathematischen Simulationsmodell eine dreidimensionale Wärmeleitungsgleichung unter Berücksichti-

gung temperaturabhängiger Dichteänderungen des Metallstrangs (6) in Echtzeit numerisch gelöst wird und die Kühlung des Metallstrangs (6) unter Berücksichtigung der errechneten Zustandsänderungen eingestellt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Metallstrang (6) als ein Stahlstrang ausgebildet ist.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei der numerischen Lösung der Wärmeleitungsgleichung unter Berücksichtigung temperaturabhängiger Dichteänderungen des Metallstrangs (6) approximierte Gleichungen für die Enthalpie verwendet werden, welche für den gesamten Metallstrang (6) die exakte Masse und die exakte Enthalpie aufweisen.

4. 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.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die thermodynamischen Zustandsänderungen aufgrund der räumlichen Symmetrie nur für ein Viertel (20) des Strangquerschnitts berechnet werden.

Claims

1. Method for continuous casting of a metal strand (6) in a continuous casting plant, wherein the metal strand (6) is extracted from a cooled continuous casting mould (1) with a fluid core (4) enclosed by a strand shell (5), supported in a strand supporting device (7) arranged downstream of the continuous casting mould (1) and cooled by a coolant, wherein thermodynamic status changes of the entire metal strand (6) are calculated in a mathematical simulation model, taking into account the physical parameters of the metal, the thickness of the metal strand (6) and the continuously measured extraction speed, **characterised in that** in the mathematical simulation model a three-dimensional thermal conduction equation taking into account temperature-dependent changes in density of the metal strand (6) is solved numerically in real time and the cooling of the metal strand (6) is adjusted while taking into account the calculated status changes.

2. Method according to claim 1, **characterised in that** the metal strand (6) is embodied as a steel strand.

3. Method according to one of the preceding claims, **characterised in that**, in the numerical solution of the thermal conduction equation taking into account temperature-dependent changes in density of the metal strand (6), approximated equations are used for the enthalpy, which have the exact mass and the exact enthalpy for the entire metal strand (6).

4. Method according to one of the preceding claims, **characterised in that** the thermal conduction equation is solved numerically using a finite volume method or a finite element method.

5. Method according to one of the preceding claims, **characterised in that** the thermodynamic status changes are only calculated for a quarter (20) of the strand cross section as a result of the spatial symmetry.

Revendications

1. Procédé pour la coulée continue d'une barre métallique (6) dans une installation de coulée, dans lequel la barre métallique (6) est extraite d'une lingotière à base ouverte refroidie (1) avec un noyau liquide (4) incorporé dans une coquille de barre (5), appuyée dans un dispositif d'appui pour barre (7) agencé en aval de la lingotière à base ouverte (1) et refroidie avec un agent réfrigérant, dans lequel des modifications d'état thermodynamiques de la barre métallique (6) dans son ensemble sont comptabilisées dans un modèle de simulation mathématique par la prise en compte des paramètres physiques du métal, de la masse volumique de la barre métallique (6) et de la vitesse de sortie mesurée en continu, **caractérisé en ce que** dans le modèle de simulation mathématique une équation de conduction de chaleur tridimensionnelle est résolue de manière numérique en temps réel par la prise en compte des modifications de masse volumique dépendantes de la température s'agissant de la barre métallique (6) et le refroidissement de la barre métallique (6) est ajusté par la prise en compte des modifications d'état calculées.

2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la barre métallique (6) est constituée en tant que barre

d'acier.

3. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** lors de la résolution numérique de l'équation de conduction de chaleur par la prise en compte des modifications de masse volumique dépendantes de la température s'agissant de la barre métallique (6) des équations simplifiées pour l'enthalpie sont utilisées, lesquelles présentent pour la barre métallique (6) dans son ensemble la masse exacte et l'enthalpie exacte.

4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'équation de conduction de chaleur est résolue numériquement par le biais d'un procédé à volumes finis ou par le biais d'un procédé à éléments finis.

5. Procédé selon l'une des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** les modifications d'état thermodynamiques ne sont calculées en raison de la symétrie spatiale que pour un quart (20) de la section de barre.

Fig. 1

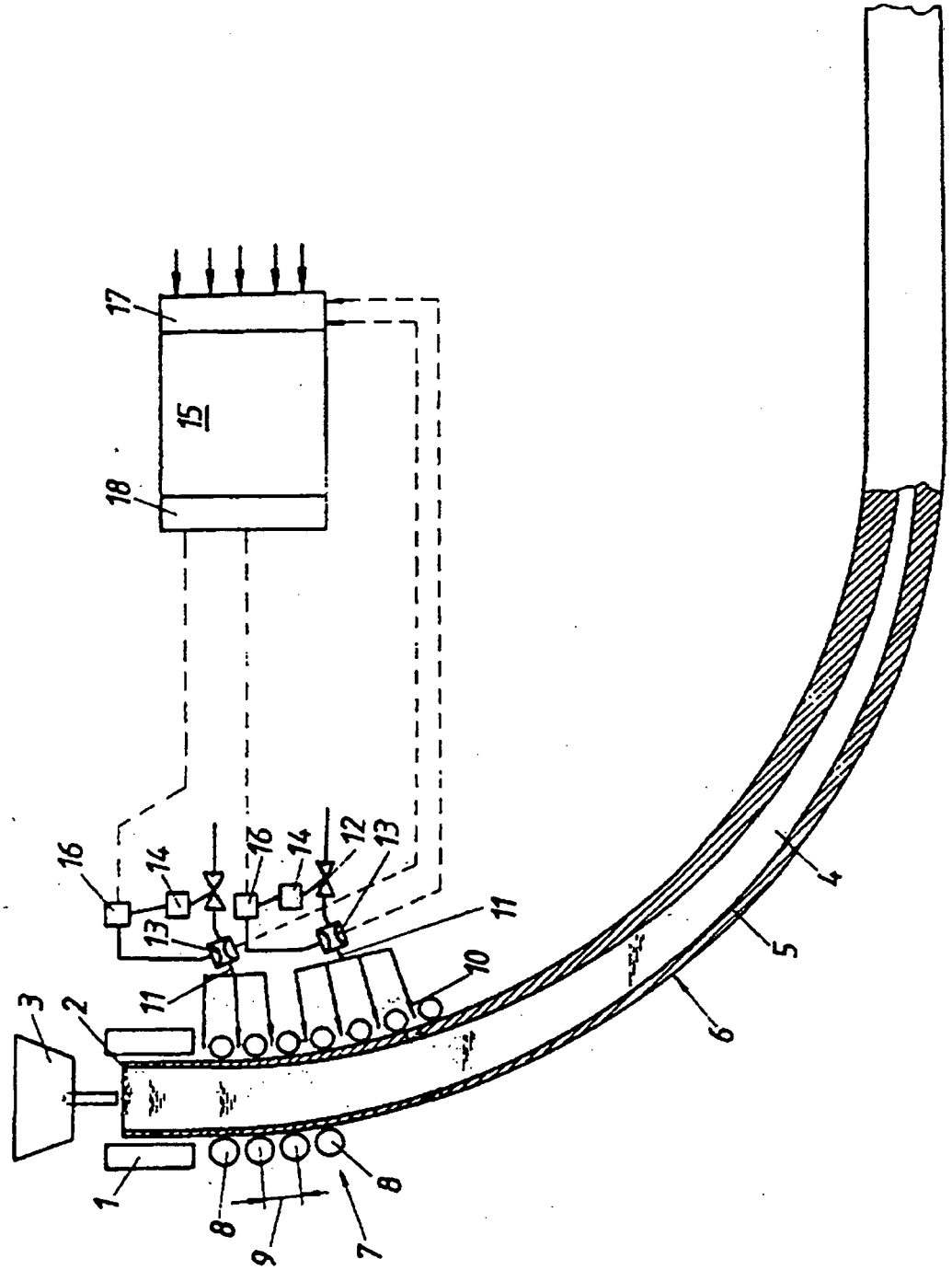


Fig. 2

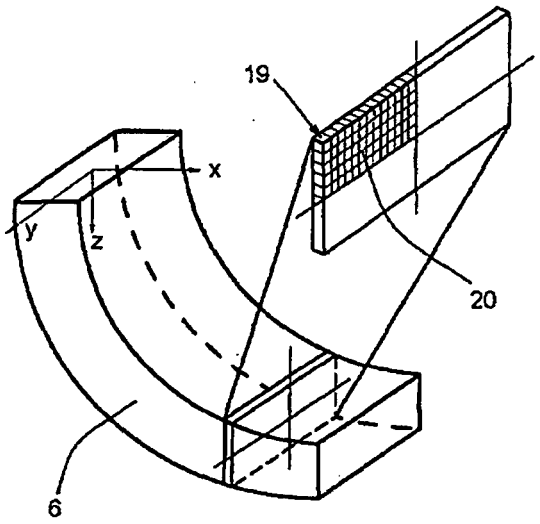
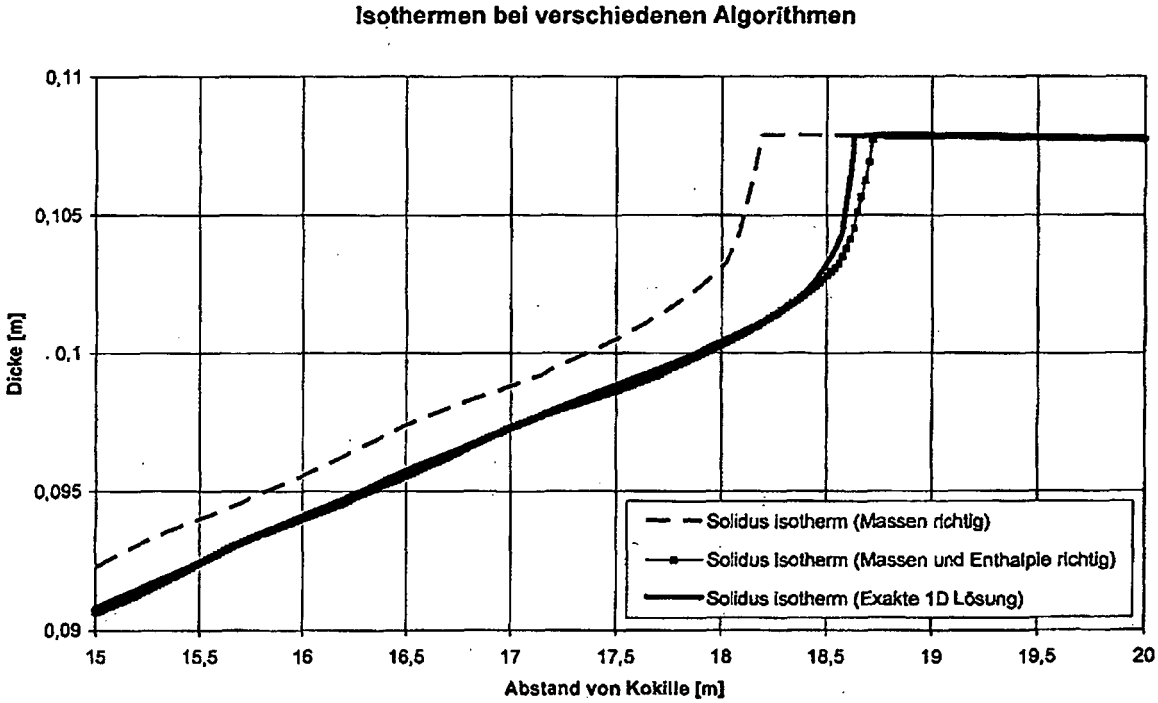

19
x
y
z
20
6

Fig. 3


Isothermen bei verschiedenen Algorithmen
0,11
0,105
0,1
0,095
0,09
Dicke [m]
15
15,5
16
16,5
17
17,5
18
18,5
19
19,5
20
Abstand von Kokille [m]
Solidus Isotherm (Massen richtig)
Solidus Isotherm (Massen und Enthalpie richtig)
Solidus Isotherm (Exakte 1D Lösung)

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 4417808 A1 **[0003] [0008]**
- EP 0997203 A1 **[0005]**

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- Kapitel 19: Numerische Mathematik. **I.N. BRONSTEIN ; K. A. SEMENDJAJEW ; G. MUSIOL ; H. MÜHLIG.** Taschenbuch der Mathematik. Verlag Harri Deutsch, 2005 **[0011]**