



(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag der Patentschrift: **11.10.95**

(51) Int. Cl.⁶: **F01D 5/28**, C21D 1/09,
C21D 9/00

(21) Anmeldenummer: **92104368.3**

(22) Anmeldetag: **13.03.92**

Die Akte enthält technische Angaben, die nach dem Eingang der Anmeldung eingereicht wurden und die nicht in dieser Patentschrift enthalten sind.

(54) **Tropfenschlagerosionsgeschützte Turbinenschaufel und Verfahren zu ihrer Herstellung.**

(30) Priorität: **30.03.91 DE 4110941**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
07.10.92 Patentblatt 92/41

(45) Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
11.10.95 Patentblatt 95/41

(84) Benannte Vertragsstaaten:
CH DE FR GB IT LI

(56) Entgegenhaltungen:
**CH-A- 483 558
CH-A- 564 089
DE-A- 2 535 251**

PROCEEDINGS OF LAMP 87 Mai 1987, OSA-KA Seiten 567 - 572; BEOGNI: 'Laser and electron beam surface hardening of turbine blades'

PROCEEDINGS OF 2ND INT. CONFERENCE "LASER IN MANUFACTURING" (ED. KIMMIT) März 1985, Seiten 119 - 128; ROTH: 'Laser hardening of a 12 % Cr steel'

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 12, no. 28 (C-471)(2875) 27. Januar 1988, & JP-A-62 180 051 (HITACHI)

(73) Patentinhaber: **FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V.
Leonrodstrasse 54
D-80636 München (DE)**

(72) Erfinder: **Brenner, Berndt Dr.
Räcknitzer Weg 1
O-8020 Dresden (DE)
Erfinder: Storch, Wilfried Dr.
Taufsteinweg 11
O-1110 Berlin (DE)
Erfinder: Wiedemann, Günter Dr.-Ing.
Luchbergstrasse 14
O-8036 Dresden (DE)**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf die Oberflächenhärtung von Maschinenbauteilen. Objekte, bei denen ihre Anwendung möglich und zweckmäßig ist, sind alle tropfenschlag- oder kavativ belasteten Maschinenbauteile aus martensitischen Chromstählen, die bei Einsatztemperaturen unterhalb von 250 °C eingesetzt werden. Besonders vorteilhaft ist die Erfindung zum Schutz stark durch Tropfenschlag erosiv belasteter Endstufenlaufschaufeln von Dampfturbinen anwendbar.

Die Laufschaufeln von Dampfturbinen unterliegen während ihres Betriebes einem ständigen Aufprall von Wassertropfen, die zu einem vorzeitigen Verschleiß und damit zur Zerstörung der Schaufeln durch Tropfenschlagerosion führen.

In der Fachwelt ist allgemein bekannt, den Verschleißwiderstand von Schaufeln aus martensitischen Chromstählen, die Kohlenstoffgehalte zwischen 0,1 bis 0,13 % bzw. 0,18 bis 0,24 % aufweisen, durch flammengehärtete Eintrittskanten zu erhöhen (Lit. z.B. W. Kuntscher, H. Kilger, H. Biegler "Technische Baustähle", Knapp-Verlag Halle 1952, S. 288 - 290).

Der Mangel solcherart gehärteter Schaufeln besteht darin, daß ihr Verschleißwiderstand zu gering ist. Die Ursache dafür resultiert daraus, daß die Oberflächenhärte mit 500 bis 550 HV zu niedrig ist.

Das Verfahren des Flammenhärtens wird üblicherweise bei Austenitisierungstemperaturen von ca. 1000 bis 1100 °C durchgeführt. Diese Austenitisierungstemperaturen führen bei den verfahrenstechnisch realisierbaren Austenitisierungszeiten nur zu einer relativ geringen Freisetzung von Kohlenstoff aus den (Fe,Cr)-Mischkarbiden. Der Mangel des Verfahrens besteht demzufolge in einer zu geringen Aufhärtung an der Oberfläche.

Höhere Austenitisierungstemperaturen verbieten sich wegen der bei den erreichbaren Austenitisierungszeiten noch während der Karbidauflösung einsetzenden Kornvergrößerung sowie der mit der Spitzentemperatur rasch zunehmenden Durchhärtung der Schaufeleintrittskante, die zu einem Zähigkeitsverlust der Schaufel und einer Verschlechterung des Eigenspannungszustandes an der Eintrittskante führt. Die Ursache des Mangels besteht deshalb in der zu geringen eintragbaren Leistungsdichte.

Nach CH-PS 564089 ist eine Turbinenschaufel mit induktiv gehärteter Eintrittskante bekannt. Entsprechend der mit dem Induktionshärteten möglichen höheren Leistungsdichte sind ohne schädliche Folgen höhere Austenitisierungstemperaturen, jedoch noch im γ -Phasengebiet liegend, möglich. Solcherart gehärtete Eintrittskanten weisen dementsprechend höhere Oberflächenhärten auf. Nachteilig wirkt sich jedoch aus, daß diese höheren Härten

von etwa 550 bis 670 HV nicht über die gesamte erosionsgefährdete Zone hinweg erzielt werden können. Der Mangel des Verfahrens besteht darin, daß die eingetragene Leistungsdichte nicht den lokal unterschiedlichen Wärmeableitungsbedingungen angepaßt werden kann, wodurch die lokale Härtetemperatur nicht über die gesamte Breite der erosionsgefährdeten Zone im erforderlichen Maße konstant gehalten werden kann.

Die Ursache dafür besteht darin, daß der Induktor nur für jeweils eine Kontur der eintrittskantennahen Zonen optimal gestaltet werden kann, die Kontur sich jedoch über die Schaufelblattlänge stark ändert.

Weiterhin ist bekannt, Laser- oder Elektronenstrahlen zur Härtung der Eintrittskanten einzusetzen (z.B.: V. Bedogni; M. Cantello; W. Cerri; D. Cruciani, R. Festa; G. Mor; F. Nenci; F.P. Vivoli: "Laser and Electron Beam Surface Hardening of Turbine Blades", in: Proceedings of the International Conference "Laser Advanced Materials Processing 87", Osaka, May 1987, pp. 567 - 572). Obwohl über die gesamte Schaufelrückenseite konstante Härtewerte erzielbar sind, ist nachteilig, daß auch hiermit keine höheren Härten als 500 - 580 HV0,1 an Proben (Material X22 CrMoV 12.1. vgl.: M. Roth; M. Cantello: "Laser Hardening of a 12 % Cr-Steel", Proceedings of 2nd Int. Conference "Laser in Manufacturing" (ed by M.F. Kimmit) 26. - 28.3.1985, S. 119 - 128) bzw. 500 - 580 HV1 an Schaufeleintrittskanten (Material AISI 403) erreicht werden.

Besonders nachteilig wirkt sich jedoch aus, daß die Härte in einer Tiefe von z.B. 0,2 mm schon auf 500 - 530 HV0,1 bzw. 480 - 560 HV1 abgefallen ist. Die nachteilige Wirkung des Härteabfalles resultiert daraus, daß einerseits bei einer Tropfenschlagbelastung mit den im Niederdruckteil von Dampfturbinen auftretenden Tropfengrößen und Tropfenaufprall-Geschwindigkeiten das Maximum der Vergleichsspannung in einer recht großen Tiefe von 0,05 mm bis 0,2 mm liegt und andererseits der Verschleiß bei intensiver Tropfenschlagbelastung erst nach Ausbildung einer belastungstypischen Oberflächenrauheit mit Rauhtiefen von einigen 10 μm bis einigen 100 μm einen stationären Endzustand erreicht. Ein zu steiler und zudem schon an der Oberfläche beginnender relativ großer Härtegradient verhindert deshalb selbst bei ausreichender Oberflächenhärte einen stationären Verschleißzustand.

Die Ursache des Härteabfalles besteht darin, daß in den in Frage kommenden Tiefen zu wenig Kohlenstoff aus den (Fe,Cr)-Mischkarbiden freigesetzt ist. Der Mangel des Verfahrens besteht demzufolge darin, daß nur in unmittelbarer Oberflächennähe genügend Kohlenstoff aus den (Fe,Cr)-Mischkarbiden freigesetzt wird, der zum Erreichen hoher Härten notwendig ist. Die Ursache dafür resultiert

daraus, daß der Temperaturgradient der angegebenen Kurzzeithärtung so steil ist, daß die Peak-Temperatur des lokalen Temperatur-Zeit-Zyklus in den in Frage kommenden Tiefen schon zu niedrig ist.

Das Ziel der Erfindung ist es, eine vor Tropfenschlagerosion besser geschützte Turbinenschaufel anzugeben sowie ein Verfahren zu ihrer Herstellung vorzuschlagen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Härtungszonenausbildung für die Eintrittskanten von Turbinenschaufeln anzugeben, bei der eine für die typischen Bedingungen der Tropfenschlagbelastung in Endstufen von Dampfturbinen ausreichend hohe Oberflächenhärte vorhanden ist und bei der auch nach Ausbildung der belastungstypischen Oberflächenaufrauhung das Maximum der Vergleichsspannung noch in einem ausreichend harten Bereich liegt.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe mit einer tropfenschlagerosionsgeschützten Turbinenschaufel aus martensitischem Chromstahl mit einer kurzzeitgehärteten Eintrittskante, deren erosionsgeschützte Zone über den gesamten stark erosionsgefährdeten Bereich der Schaufelrückenseite eine konstante Oberflächenhärte aufweist, wie in den Ansprüchen 1 bis 4 dargestellt, gelöst.

Die in Anspruch 2 beschriebene zweckmäßige Ausgestaltung der Erfindung macht von der Tatsache vorteilhaft Gebrauch, daß gewöhnlich die Stärke und Fläche der Tropfenschlagbelastung zur Schaufelspitze hin stark zunimmt, während die zyklische Belastung abnimmt, so daß bei ausreichen der Verschleißbeständigkeit durch die Abnahme der Härtungszonenbreite der Eigenspannungszustand an der Eintrittskante verbessert und die Zähigkeitsreserven der Schaufel vergrößert werden können.

Außerdem wird die Aufgabe durch ein Kurzzeit-härtungsverfahren für martensitische chromlegierte Turbinenschaufelstähle gelöst, bei dem auch in der erforderlichen Tiefe von 0,1 mm bis etwa 0,9 mm eine Peak-Temperatur des lokalen Temperatur-Zeit-Zyklus erreicht wird, bei der noch eine vollständige Karbidauflösung stattfindet, ohne daß an der Oberfläche schon eine eigenschaftsvorschlechternde Austenit-Kornvergrößerung stattfindet.

Erfindungsgemäß wird dabei wie in den Ansprüchen 5 bis 10 angegeben verfahren.

Bei der Verfahrensausgestaltung gemäß Anspruch 6 wird dabei vorteilhafterweise die Tatsache berücksichtigt, daß bei Unterschreitung einer Schaufelblattdicke von etwa 3 mm sich die Abkühlgeschwindigkeit schon in dem Temperaturgebiet, in dem noch eine Austenit-Kornvergrößerung ablaufen kann, aufgrund schlechterer Wärmeableitungsmöglichkeiten verringert.

Vorteilhaft bei der Verfahrensausgestaltung gemäß Anspruch 7 ist, daß damit eine Anpassung der optimalen Strahleinwirkungsdauer τ_s an die notwendige Härtungszonenbreite erreicht wird.

Der Vorteil der Verfahrensausgestaltung gemäß Anspruch 8 besteht darin, daß dieses ungewöhnlich kleine Amplitudenverhältnis die Einstellung einer nahezu konstanten Oberflächentemperatur T_s quer zur Laserspur innerhalb der sehr harten Zone auch unter den Bedingungen einer sehr asymmetrischen Wärmeableitung an der Schaufeleintrittskante erlaubt.

Die Erfindung ist am nachfolgenden Ausführungsbeispiel näher erläutert.

In der dazugehörigen Zeichnung (Figur 1) ist eine schematische Darstellung der Lage und des Aufbaues des erfindungsgemäßen Kantenschutzes dargestellt.

Beispiel 1:

Die tropfenschlagbelastete Endstufenlaufschaufl einer 100 MW-Turbine, soll mit einer verschleißbeständigen Eintrittskante versehen werden. Die erwartete Erosionszonenbreite beträgt an der Schaufel spitze 18 mm und nimmt zum Schaufelfuß zu geringfügig ab.

Die eingesetzte Härteanlage besteht aus einem CO₂-Querstromlaser mit einer Nominalleistung von 5 kW, einer Bewegungsmaschine, die zur Realisierung der Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Eintrittskante dient und deren Steuerung die gleichzeitige Bewegung in mindestens 4 Koordinaten zuläßt. Das Strahlformungssystem besteht aus einem off-axis-Parabolspiegel mit einer Brennweite von f = 300 mm sowie einem sich im teilkommunikierten Strahl befindlichen Resonanzscanner, der den Strahl mit einer Frequenz von 210 Hz senkrecht zur Strahlvorschubrichtung oszillieren läßt.

Das zu härtende Gebiet wird mit einer etwa 80 µm dicken Schicht schwarzer Schultafelfarbe o.ä. versehen, die als Absorptionsmittel für die Laserstrahlung dient.

Anhand von Nomogrammen wird ausgehend von der vorab gemessenen Dicke des Schaufelblattprofiles - in Abhängigkeit vom Abstand zur Schaufel spitze - ein geeigneter Satz von Bestrahlungsparametern (Laserleistung, Strahldefokussierung, Oszillationsamplitude, Vorschubgeschwindigkeit) festgelegt, der an jeder Stelle der Eintrittskante zur erfindungsgemäßen Ausbildung der Härtungszone führt.

Anschließend wird durch Abtasten der Schaufeleintrittskante das Kontursteuerprogramm erstellt. Die Neigung des zu härtenden Gebietes relativ zum Laserstrahl wird so gewählt, daß sich im Zusammenwirken mit der eingestellten Leistungsdichteveerteilung des Laserstrahles quer zur Vorschub-

richtung eine konstante Temperatur in der am stärksten verschleißbelasteten Zone (der späteren sehr harten Schicht 2) einstellt. Die Leistungsdichteverteilung im Laserstrahl lässt sich durch die Wahl des Verhältnisses Schwingamplitude des Strahles A zu Radius des Stahles r in ausreichendem Maße variieren.

Die Laserstrahlhärtung wird unter folgenden Parametern durchgeführt: An der Turbinenschaufel auftreffende Laserleistung $P_L = 2,60 \text{ kW}$; von der Turbinenschaufel absorbierte Laserleistung $P_a = 2,08 \text{ kW}$; Strahldurchmesser in Vorschubrichtung (entspricht Laserstrahldurchmesser auf der Schaufeloberfläche) $2 \cdot r = 9,6 \text{ mm}$, Leistungsdichte $8,55 \text{ W/mm}^2$, Schwingamplitude des Laserstrahles $A = 8,9 \text{ mm}$, Amplitudenverhältnis $A/r = 1,85$; Anfangsgeschwindigkeit des Laserstrahles an der Schaufelspitze $v_{B0} = 242 \text{ mm/min}$, Strahlformstrekung ($d \perp v$) / ($d \parallel v$) = 2,85.

Die Laserstrahlhärtung mit diesen Parametern führt in der Nähe der Eintrittskante 5 zu folgenden Werten des Temperaturfeldes: Maximaltemperatur des Temperatur-Zeit-Zyklus auf dem Schaufelrücken über eine Breite von 16 mm: $T_s \max \approx 1400 - 1440^\circ\text{C}$, Laserstrahleinwirkungsduer: $\tau_s = 2,38 \text{ s}$.

Die mit diesen Parametern geärtete Turbinenschaufel weist an der Eintrittskante 5 eine Härtungszone folgender geometrischer Abmessungen, Härte und Härteverteilung auf: Breite der gesamten Härtungszone 1 auf dem Schaufelrücken (Lage der Härtungszonen siehe Figur 1) an der Schaufelspitze: 20,2 mm; Breite der Härtungszone 1 in 150 mm Abstand von der Schaufelspitze: 18,7 mm; Gesamteinhärtungstiefe 4: 1,17 mm bis 2,9 mm in Abhängigkeit vom Abstand zur Eintrittskante, Breite der gesamten Härtungszone 1 auf der Schaufelbauchseite 7: 2,8 mm in der Nähe der Schaufelspitze; Oberflächenhärte in der sehr harten Schicht 2: 700 HV0,05 ± 35 HV0,05; Tiefe der sehr harten Schicht 2: 0,1 mm bis 0,45 mm, abnehmend mit zunehmendem Abstand zur Eintrittskante, an der Eintrittskante auslaufend etwa am Ort der stärksten Krümmung des Schaufelblattprofiles. Der Härtegradient in der sehr harten Schicht 2 beträgt ≤ 30 HV/mm. Die Breite der sehr harten Schicht 2 beträgt in der Nähe der Schaufelspitze etwa 19 mm. Die Länge der gesamten Härtungszone 1 beläuft sich auf 185 mm. Sie verlässt die Schaufel unter einem Austrittswinkel von 45°. Die Reproduzierbarkeit des angestrebten erfindungsgemäßen Härte-Tiefen-Verlaufes ist sehr gut. Entsprechend der abnehmenden Verschleißintensität nimmt sowohl die Tiefe der sehr harten Schicht 2 wie auch die Gesamteinhärtungstiefe 4 mit zunehmendem Abstand zur Eintrittskante ab. Die Lage des Vergleichsspannungsmaximums befindet sich bei weniger als einem Drittel der Tiefe der sehr harten Schicht 2. Eine eigenschaftsverschlechternde Ver-

größerung der Austenitkorngroße tritt nicht auf.

Gegenüber dem Stand der Technik werden mindestens 100 bis 150 HV höhere Oberflächenhärten erzielt. In der Tiefe des Vergleichsspannungsmaximums ist die Härdedifferenz noch größer.

Damit sind erheblich bessere Verschleißbeständigkeiten der erfindungsgemäß gehärteten Turbinenschaufeln gesichert.

Ein weiterer Vorteil gegenüber flammengehärteten und in abgeminderter Form auch gegenüber induktionsgehärteten Schaufeln besteht in der reproduzierbareren und beanspruchungsgerechteren Ausbildung der Härtungszonengeometrie längs der Eintrittskante. Sie führt u.a. auch zu einer viel besseren Reproduzierbarkeit der Einstellung eines eintrittskantennahen Druckeigenspannungszustandes längs der Eintrittskante über die gesamte gehärtete Schaufellänge.

Aufstellung der verwendeten Bezugssymbole und Begriffe

- | | |
|-------|--|
| 1 | - gesamte Härtungszone |
| 2 | - sehr harte Schicht |
| 3 | - an 2 anschließende Schicht |
| 4 | - Gesamteinhärtungstiefe |
| 5 | - Eintrittskante |
| 6 | - Auftreffrichtung der schädlichsten Tröpfchengrößenfraktion |
| 7 | - Ort an der Schaufelbauchseite |
| 8 | - Tangente an die Oberfläche am Ort 7 |
| 9 | - minimales Biegemoment des Schaufelquerschnittes |
| 10 | - Schaufelquerschnitt |
| Q_L | - Querschnitt der gesamten Härtungszone 1 |
| Q_s | - Querschnitt des gehärteten Schaufelprofilabschnittes |

Patentansprüche

1. Tropfenschlagerosionsgeschützte Turbinenschaufel aus martensitischem Chromstahl mit einer kurzzeitgehärteten Eintrittskante, deren erosionsgeschützte Zone über den gesamten stark erosionsgefährdeten Bereich der Schaufelrückenseite eine konstante Oberflächenhärte aufweist,
dadurch gekennzeichnet, daß
 - diese konstante Oberflächenhärte der Maximalhärte entspricht, die bei dem jeweiligen Stahl nach einer vollständigen Auflösung der (Fe,Cr)-Mischkarbide erreichbar ist,
 - diese Härte je nach Kohlenstoffgehalt und mit diesem zunehmend bei einem Kohlenstoffgehalt von 0,1 - 0,13 % C

- eine Härte von 580 - 620 HV0,05 und bei 0,18 - 0,24 % C eine Härte von 600 - 750 HV0,05 erreicht,
- die gesamte Härtungszone (1) aus einer sehr harten Schicht (2) mit einem ersten Härteteplateau, das diese Maximalhärten erreicht und mit einer nach der Verschleißintensität und der Tiefenlage des Vergleichsspannungsmaximums gewählten Tiefe von 0,1 mm bis 0,9 mm besteht, in der der Härtegradient um 0 bis 100 HV/mm beträgt und an deren unterer Berandung je nach Kohlenstoffgehalt von 0,1 bis 0,13 % C mindestens noch Härten von 550 - 600 HV0,05 und bei einem Kohlenstoffgehalt von 0,18 bis 0,24 % C noch Härten von 580 bis 680 HV0,05 aufweist,
 - sowie eine daran anschließende Schicht (3) besteht, die eine Dicke von 0,4 mm bis 2,0 mm erreicht und bei einem in Oberflächennähe deutlich größeren Härtegradienten und zumindest andeutungsweise ein zweites Härteteplateau bei einer Härte von 350 - 540 HV0,05 aufweist,
 - die Gesamteinhärtungstiefe (4) in Abhängigkeit von der Verschleißintensität 0,7 mm bis 3,5 mm beträgt,
 - die sehr harte Schicht (2) mindestens bis an den Ort (5) in der Nähe der Eintrittskante reicht, an dem die Auftreffrichtung (6) der schädlichsten Tröpfchengröße-Fraktion parallel zur Tangente an die Oberfläche liegt,
 - die Härtungszone (1) sich von der Schaufelblattspitze in Richtung Schaufelfuß über die gesamte erosionsgefährdete Länge der Eintrittskante (5) hinweg bis zu einer Stelle minimaler oder zumindest nicht kritischer zyklischer Belastung der Schaufel erstreckt und dort die Schaufel unter einem Austrittswinkel zur Eintrittskante von 30 bis 65° verläßt.
2. Tropfenschlagerosionsgeschützte Turbinenschaufel nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, daß die Breite der Härtungszone (1) nach der sich längs der Eintrittskante ändernden Breite der Erosionszone eingestellt wird.
3. Tropfenschlagerosionsgeschützte Turbinenschaufel nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, daß die Gesamteinhärtungstiefe (4) bei stark zyklisch oder spannungsriß-korrosionsbelasteten Schaufeln mindestens bis an den Ort (7) an der Schaufelbauchseite heranreicht, an dem die Tangente
- (8) an die Oberfläche senkrecht zur Richtung des minimalen Biegemomentes (9) des Schaufelquerschnittes (10) steht.
- 5 4. Tropfenschlagerosionsgeschützte Turbinenschaufel nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, daß die schaufelrückenseitige Berandung der Härtungszone (1) um ein Dämpferdrahtloch mit dem Radius R_D einen Kreisbogen mit dem Radius R_S beschreibt, wobei gilt:
- $$R_D + 3 \text{ mm} \leq R_S \leq R_D + 10 \text{ mm}$$
- 15 5. Verfahren zur Herstellung der tropfenschlag-erosionsgeschützten Turbinenschaufel von Anspruch 1 bis 4 mittels eines hochenergetischen Oberflächenhärteverfahrens,
dadurch gekennzeichnet, daß
- der Temperatur-Zeit-Zyklus des Kurzzeit-härtens so geführt wird, daß am Ende einer Energieeinwirkungsdauer τ_s von 0,3 s $\leq \tau_s \leq 3$ s eine Oberflächentemperatur $T_{s \max}$ beträchtlich oberhalb des γ -Gebietes von $1380^\circ\text{C} \leq T_{s \max} \leq 1430^\circ\text{C}$ erreicht wird, über eine entsprechende Kombination von Leistungsdichte, Vorschubgeschwindigkeit und Strahlabmessung in Vorschubrichtung der oberflächennahe Temperaturgradient so eingestellt wird, daß in einer Tiefe t von 0,1 mm $\leq t \leq 0,9$ mm noch eine Maximaltemperatur des lokalen Temperatur-Zeit-Zyklus T_L von $T_L \approx T_{s \max} - (60 \cdot B \cdot [K] + 36 \cdot C \cdot \tau_s \cdot [K \cdot s^{-1}])$, wobei [K] die Maßeinheit Kelvin und [K \cdot s $^{-1}$] die Maßeinheit Kelvin pro Sekunde darstellt, herrscht, wobei die Konstanten B und C etwa den Wert 1 erreichen, der genaue Wert jedoch nach der chemischen Zusammensetzung und dem Ausgangsgefüge des Stahles gewählt wird,
 - und daß die Leistungsdichteverteilung quer zur Strahlvorschubrichtung so eingestellt wird, daß die lokale Oberflächentemperatur T_s an keiner Stelle der Oberfläche der sehr harten Schicht (2) den Wert $T_{s \max}$ um mehr als 50 K unterschreitet.
- 20 6. Verfahren nach Anspruch 5,
dadurch gekennzeichnet, daß zum Härteln von Schaufelblattpartien, deren mittlere Dicke 3 mm unterschreitet, bei konstanter Oberflächentemperatur $T_{s \max}$ die maximal mögliche Energieeinwirkungsdauer $\tau_{s \max}$ entsprechend dem Verhältnis des erwünschten Querschnitts
- 25 30 35 40 45 50 55

- Q_L der Härtungszone (1) zum Querschnitt Q_s des Schaufelprofilabschnittes nach $\tau_{s \text{ max}} = 3$ • $L \cdot [s] - K \cdot (Q_L/Q_s) \cdot [s]$ reduziert wird, wobei K und L vom gewählten Stahl abhängende Konstanten mit einem Wert nahe 1 sind. 5
7. Verfahren nach Anspruch 5,
dadurch gekennzeichnet, daß bei Anwendung eines Laserstrahl- oder Elektronenstrahlhärteverfahrens eine Strahlformung dergestalt vorgenommen wird, daß das Verhältnis der Ausdehnung des Strahles senkrecht zur Strahlvorschubrichtung $d \perp v$ zur Ausdehnung des Strahles in Strahlvorschubrichtung $d \parallel v$ im Bereich $2 \leq (d \perp v) / (d \parallel v) \leq 8$ gewählt wird. 10 15
8. Verfahren nach Anspruch 5 und 7,
dadurch gekennzeichnet, daß die Stahlformung durch die schnelle Oszillation des Laserstrahles oder Elektronenstrahles quer zur Vorschubrichtung erzeugt wird, wobei im Falle des Laserstrahles bei sinusförmigem Bewegungsgesetz in Abhängigkeit von der Leistungsdichteverteilung des nichtumgeformten Laserstrahles ein Verhältnis von Schwingamplitude des Strahles A zum Radius r des Strahles von 20 25 30
- $1,3 \leq A/r \leq 2,1$ gewählt wird.
9. Verfahren nach Anspruch 5, 7 und 8,
dadurch gekennzeichnet, daß das Verhältnis A/r der Schwingungsamplitude zum Strahlradius r während des Oberflächenhärtens entsprechend der Änderung des eintrittskantennahen Schaufelblattprofiles stetig verändert wird. 35
10. Verfahren nach Anspruch 5 und 9,
dadurch gekennzeichnet, daß die Stahlformung durch die schnelle Oszillation des Laserstrahles oder Elektronenstrahles quer zur Vorschubrichtung erzeugt wird, wobei in beiden Fällen die momentane Strahlleistung oder das Bewegungsgesetz der Strahlloszillation nach der Neigung der Strahlachse zur lokalen Oberflächennormalen und den Wärmeableitungsbedingungen des eintrittskantennahen Schaufelblattprofiles gewählt und entsprechend der Änderung der Oberflächennormalen und den Wärmeableitungsbedingungen entlang der Eintrittskante während des Kurzzeithärtens verändert wird. 40 45 50 55
- leading edge whose erosion protected zone comprises a constant surface hardness over the entire strongly erosion-endangered region of the reverse side of the blade, characterised in that
- this constant surface hardness corresponds to the maximum hardness which is achievable with the respective steel after complete dissolution of the mixed Fe/Cr carbides,
 - this hardness according to carbon content and increasing with it attains a hardness of 580 - 620 HV0.05 with a carbon content of 0.1 - 0.13 %C and a hardness of 600 - 750 HV0.05 with 0.18 - 0.24 %C,
 - the entire hardening zone (1) consists of a very hard layer (2) with a first hardness plateau that attains these maximum hardnesses and with a depth of 0.1 mm to 0.9 mm selected according to the intensity of wear and the depth position of the reference stress maximum in which the hardness gradient amounts to about 0 to 100 HV/mm and at whose lower boundary depending on carbon content from 0.1 to 0.13 %C still exhibits hardnesses of at least 550 - 600 HV0.05 and with a carbon content of 0.18 to 0.24 %C, hardnesses of 580 to 680 HV0.05,
 - and an adjacent layer (3) which attains a thickness of 0.4 mm to 2.0 mm and with a significantly larger hardness gradient close to the surface and at least indicatively comprises a second hardness plateau with a hardness of 350 - 540 HV0.05,
 - the total hardening depth (4) depending on the intensity of wear amounts to 0.7 mm to 3.5 mm,
 - the very hard layer (2) reaches at least to the location (5) in the vicinity of the leading edge at which the impact direction (6) of the most damaging droplet size fraction lies parallel to the tangent at the surface,
 - the hardening zone (1) extends from the tip of the blade in the direction of the base of the blade over the entire erosion-endangered length of the leading edge (5) as far as a location of minimal or at least non-critical cyclic loading of the blade and there leaves the blade at an exit angle of 30 to 65° to the leading edge.
- Claims
1. Turbine blade made of martensitic chromium steel protected against erosion by impingement of drops with a short-cycle hardened
 2. Turbine blade protected against erosion by the impingement of drops according to claim 1, characterised in that the width of the hardening

zone (1) is adjusted according to the varying width of the erosion zone along the leading edge.

3. Turbine blade protected against erosion by the impingement of drops according to claim 1, characterised in that the total hardening depth (4) in the case of blades subject to highly cyclical or stress-crack corrosion loadings reaches at least as far as the location (7) on the bucket side of the blade at which the tangent (8) at the surface stands perpendicularly to the direction of the minimum bending moment (9) of the cross-section (10) of the blade.
4. Turbine blade protected against erosion by the impingement of drops according to claim 1, characterised in that the boundary of the hardening zone (1) on the reverse side of the blade describes an arc of a circle with the radius R_S about a damping rod hole with the radius R_D such that:

$$R_D + 3 \text{ mm} \leq R_S \leq R_D + 10 \text{ mm.}$$

5. Method for manufacturing the turbine blade protected against erosion by the impingement of drops of claim 1 to 4 by means of a high-energy surface hardening process, characterised in that
 - the temperature-time cycle of the short-cycle hardening is conducted so that at the end of a period of energy application τ_S of $0.3 \text{ s} \leq \tau_S \leq 3 \text{ s}$ a surface temperature $T_{S \max}$ considerably in excess of the γ -region of $1380^\circ\text{C} \leq T_{S \max} \leq 1430^\circ\text{C}$ is attained, the temperature gradient close to the surface is adjusted in the direction of advancement through an appropriate combination of power density, rate of advancement and beam dimension in such a way that at a depth t of $0.1 \text{ mm} \leq t \leq 0.9 \text{ mm}$ a maximum temperature of the local temperature-time cycle T_L of $T_L \approx T_{S \max} - (60 * B * [K] + 36 * C * \tau_S * [K * s^{-1}])$ where [K] represents the Kelvin unit of measure and $[K * s^{-1}]$ the unit of measure of Kelvin per second, still prevails, where the constants B and C attain approximately the value 1, the exact value, however, being selected according to the chemical composition and the initial structure of the steel,
 - and that the power density distribution transversely to the beam advancement direction is adjusted in such a way that

the local surface temperature T_S does not fall below the value $T_{S \max}$ by more than 50 K at any point of the surface of the very hard layer (2).

- 5
 6. Method according to claim 5, characterised in that for hardening batches of blades whose average thickness is less than 3 mm, at constant surface temperature $T_{S \max}$ the maximum possible energy application duration $\tau_{S \max}$ is reduced according to the ratio of the desired cross-section Q_L of the hardening zone (1) to the cross-section Q_S of the profile of the blade segment according to $\tau_{S \max} = 3 * L * [s] - K * (Q_L/Q_S) * [s]$, where K and L are constants depending on the steel selected with a value close to 1.
 - 10
 7. Method according to claim 5, characterised in that, when using a laser-beam or electron-beam hardening process, shaping of the beam is undertaken in such a manner that the ratio of the spread of the beam perpendicular to the direction of beam advancement $d \perp v$ to the spread of the beam in the direction of beam advancement $d \parallel v$ is selected in the range $2 \leq (d \perp v) / (d \parallel v) \leq 8$.
 - 15
 8. Method according to claim 5 and 7, characterised in that the shape of the beam is produced by the rapid oscillation of the laser beam or electron beam transversely to the direction of advancement such that, in the case of the laser beam subject to sinusoidal motion, a ratio of the amplitude of oscillation of the beam, A, to the radius, r, of the beam of
 - 20
 - 30
 - 35
 - 40
 - 45
 - 50
 - 55
- $1.3 \leq A/r \leq 2.1$
- is selected as a function of the power density distribution of the non-reshaped laser beam.
9. Method according to claim 5, 7 and 8, characterised in that the ratio A/r of the amplitude of oscillation to the radius of the beam r is constantly changed during the surface hardening according to the change of the blade cross-section close to the leading edge.
 10. Method according to claim 5 and 9, characterised in that the shape of the beam is produced by the rapid oscillation of the laser beam or electron beam transversely to the direction of advancement such that in both cases the momentary radiative power or the law of motion of the beam oscillation is selected according to the inclination of the beam axis to the local normal to the surface and the

heat conduction conditions of the blade cross-section close to the leading edge and is changed according to the change of the normal to the surface and the heat conduction conditions along the leading edge during the short-cycle hardening.

5

Revendications

1. Aube de turbine protégée contre l'érosion due à l'impact de gouttes et réalisée en acier martensitique au chrome, comportant un bord d'entrée durci au moyen d'une trempe de brève durée et dont la zone, protégée contre l'érosion, possède une dureté superficielle constante, sur l'ensemble de la zone, fortement affecté par l'érosion, de la face arrière de l'aube,

caractérisée en ce que

- cette dureté superficielle constante correspond à la dureté maximale, que l'on peut obtenir pour l'acier considéré, après une dissolution complète des carbures mixtes de (Fe, Cr),

10

- en fonction de la teneur en carbone et tout en augmentant avec cette dernière, cette dureté atteint pour une teneur en carbone de 0,1-0,13 % C, une dureté de 580-620 HV0,05 et, pour 0,18-0,24 % C, une dureté de 600-750 HV0,05,

15

- l'ensemble de la zone de trempe (1) est constitué par une couche très dure (2) possédant un premier niveau de dureté, qui atteint ces duretés maximales, et une profondeur de 0,1 mm à 0,9 mm, choisie en fonction du degré d'usure et de la position en profondeur du maximum de contrainte de référence et à laquelle le gradient de dureté va de 0 à 100 HV/mm, et possède, au niveau de son bord inférieur, en fonction de la teneur en carbone de 0,1 à 0,13 % C, au moins encore des duretés de 550-600 HV0,05 et, pour une teneur en carbone de 0,18 à 0,24 % C, encore des duretés de 580 à 680 HV0,05,

20

- ainsi que par une couche (3), qui succède à la précédente et atteint une épaisseur de 0,4 mm à 2,0 mm et possède, pour un gradient de dureté nettement supérieur à proximité de la surface, et au moins, d'une manière indicative, un second niveau de dureté pour une dureté de 350-540 HV0,05,

25

- la profondeur totale de trempe (4) est comprise entre 0,7 mm et 3,5 mm en fonction du degré d'usure,

30

35

40

45

50

- la couche très dure (2) s'étend, au moins jusqu'à l'emplacement (5) situé à proximité du bord d'entrée et au niveau duquel la direction d'impact (6) de la fraction la plus nuisible des tailles des gouttelettes est parallèle à la tangente à la surface,
- la zone de trempe (1) s'étend depuis la pointe de l'aube en direction du pied de l'aube sur toute la longueur, soumise à érosion, du bord d'entrée (5), jusqu'à un emplacement de contrainte cyclique minimale ou au moins non critique de l'aube et, en cet endroit, se sépare de l'aube sous un angle de sortie de 30 à 65° par rapport au bord d'entrée.

2. Aube de turbine protégée contre l'érosion due à l'impact de gouttes selon la revendication 1, caractérisée en ce que la largeur de la zone de trempe (1) est réglée en fonction de la largeur, qui varie le long du bord d'entrée, de la zone d'érosion.

3. Aube de turbine protégée contre l'érosion due à l'impact de gouttes selon la revendication 1, caractérisée en ce que la profondeur totale de trempe (4) s'étend, pour des aubes fortement chargées par une corrosion cyclique ou par une corrosion à criques de tension, au moins jusqu'à l'emplacement (7) du côté convexe de l'aube, au niveau duquel la tangente (8) à la surface est perpendiculaire à la direction du moment fléchissant minimum (9) de la section transversale (10) de l'aube.

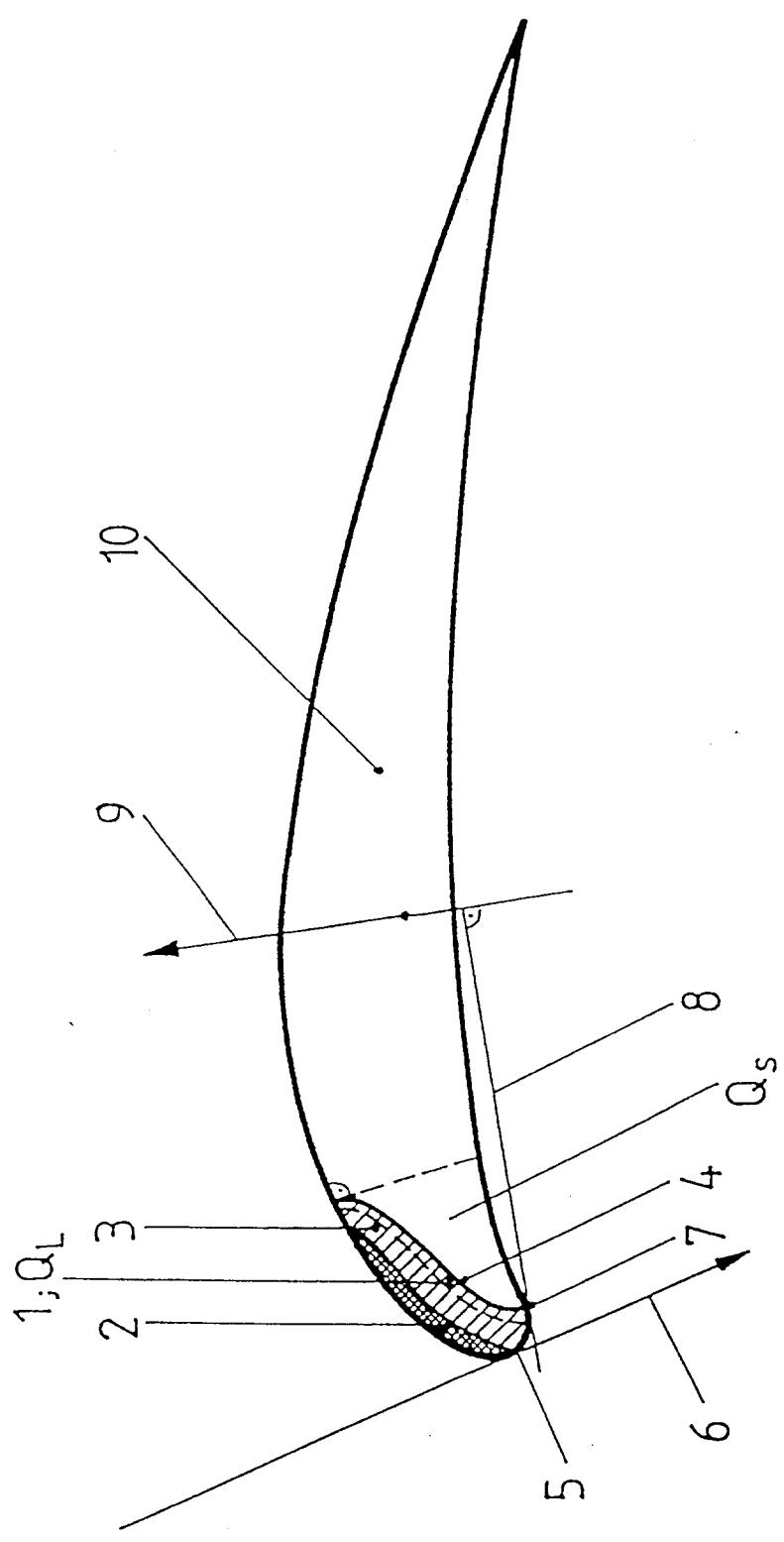
4. Aube de turbine protégée contre l'érosion due à l'impact de gouttes selon la revendication 1, caractérisée en ce que le bord, situé sur le côté arrière de l'aube, de la zone de trempe (1) suit, autour d'un trou de fil d'amortissement de rayon R_D , un cercle de rayon R_S , avec :

$$R_D + 3 \text{ mm} \leq R_S \leq R_D + 10 \text{ mm.}$$

5. Procédé pour fabriquer des aubes de turbine protégées contre l'érosion due à l'impact de gouttes selon les revendications 1 à 4, à l'aide d'un procédé de trempe superficielle de haute énergie, caractérisé en ce que

- le cycle température - temps de la trempe de brève durée est exécuté de telle sorte qu'à la fin d'une durée d'application d'une énergie τ_s de $0,3 \text{ s} \leq \tau_s \leq 3 \text{ s}$ une température de surface $T_{s \max}$ nettement supérieure à la gamme γ de $1380^\circ\text{C} \leq T_{s \max} \leq 1430^\circ\text{C}$, grâce à une

- combinaison correspondante de la densité de puissance de la vitesse d'avance et de la dimension du rayonnement dans la direction d'avance, où on mesure le gradient de température proche de la surface de telle sorte qu'à une profondeur t telle que $0,1 \text{ mm} \leq t \leq 0,9 \text{ mm}$, il existe encore une température maximale du cycle local température - temps T_L égale à $T_L \approx T_{s \max} - (60.B.[K] + 36.C.\tau_s.[K.s^{-1}])$, [K] étant l'unité de mesure Kelvin et [K.s⁻¹] étant l'unité de mesure Kelvin par seconde, les constantes B et C atteignant approximativement la valeur 1, mais la valeur précise étant choisie en fonction de la composition chimique et de la structure de départ de l'acier, et
- que la distribution de densité de puissance transversalement par rapport à la direction d'avance du rayonnement est réglée de telle sorte que la température superficielle locale T_s ne tombe plus au-delà de 50 K au-dessous de la valeur $T_{s \ max}$ en aucun emplacement de la surface de la couche très dure (2).
6. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que pour réaliser la trempe de parties de l'aube, dont l'épaisseur moyenne est inférieure à 3 mm, pour une température superficielle constante $T_{s \ max}$ on réduit la durée maximale possible d'application de l'énergie $\tau_{s \ max}$ en fonction du rapport de la section transversale désirée Q_L de la zone de trempe (1) de la section transversale Q_s de la section du profil d'aube conformément à $\tau_{s \ max} = 3.L.[s].K.(Q_L/Q_s).[s]$, K et L étant des constantes qui dépendent de l'acier sélectionné et possèdent une valeur proche de 1.
7. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que dans le cas de l'utilisation d'un procédé mettant en oeuvre un faisceau laser ou un faisceau d'électrons, on réalise une mise en forme du faisceau de telle sorte que le rapport de l'étendue du faisceau perpendiculairement à la direction d'avance du faisceau $d \perp v$ à l'étendue du faisceau dans la direction d'avance du faisceau $D \parallel v$ dans la gamme $2 \leq (d \perp v)/(D \parallel v) \leq 8$.
8. Procédé selon les revendications 5 et 7, caractérisé en ce qu'on réalise la mise en forme du faisceau au moyen de l'oscillation rapide du faisceau laser ou du faisceau d'électrons transversalement par rapport à la direction d'avance, auquel cas, pour le faisceau laser, dans le cas d'une loi de déplacement sinusoïdal, on
- 5 choisit, en fonction de la distribution de la densité de puissance du faisceau laser non transformé, un rapport de l'amplitude d'oscillation du faisceau A au rayon r du faisceau, égal à
- 10 $1,2 \leq A/r \leq 2,1$.
- 15 9. Procédé selon les revendications 5, 7 et 8, caractérisé en ce qu'on modifie de façon continue le rapport A/r de l'amplitude d'oscillation au rayon r du faisceau pendant la trempe superficielle en fonction de la variation du profil de l'aube, proche du bord d'entrée.
- 20 10. Procédé selon les revendications 5 et 9, caractérisé en ce que la mise en forme du faisceau est exécutée au moyen de l'oscillation rapide du faisceau laser ou du faisceau d'électrons transversalement par rapport à la direction d'avance, et, dans les deux cas, on choisit la puissance instantanée du faisceau ou la loi de déplacement de l'oscillation du faisceau en fonction de l'inclinaison de l'axe du faisceau par rapport à la normale locale à la surface et en fonction des conditions d'évacuation de chaleur du profil d'aube proche du bord d'entrée, et on le modifie en fonction de la variation de la normale à la surface et des conditions d'évacuation de chaleur le long du bord d'entrée, pendant la trempe exécutée en un bref intervalle de temps.
- 25
- 30
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55



Figur 1