

19



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Économie

11

N° de publication :

LU600007

<https://patent.public.lu/fo-eregister-view/>

12

BREVET D'INVENTION

B1

21

N° de dépôt: LU600007

51

Int. Cl.:

B23K 35/00, B23K 1/00, C21D 1/00

22

Date de dépôt: 23/12/2024

30

Priorité:

73

Titulaire(s):

SUZHOU UNIVERSITY – Suzhou City (China)

43

Date de mise à disposition du public: 24/06/2025

72

Inventeur(s):

LI Hengzheng – (China), MENG Yanyan – (China)

47

Date de délivrance: 24/06/2025

74

Mandataire(s):

IP SHIELD – 1616 Luxembourg (Luxemburg)

DX

Date d'expiration: 23/12/2030

85

Date d'entrée en phase nationale:

86

N° de dépôt de la demande internationale:

54

Ein Verfahren zur hochfrequenten Laserpräzisionsschweißung von hochgekohtem Stahl mit kontrollierter lokaler Wärmebehandlung.

57

Die Erfindung betrifft den Bereich der Schweißtechnik und bezieht sich konkret auf ein Verfahren zur hochfrequenten Laserpräzisionsschweißung von hochgekohtem Stahl mit kontrollierter lokaler Wärmebehandlung, das die folgenden Schritte umfasst: S1: Auswahl von hochgekohtem Stahl und Entfernung von Oberflächenverunreinigungen durch chemische Reinigung und mechanische Aufrauung; S2: Durchführung einer Laser-Vorwärmung vor dem Schweißen, wobei Temperatur und Aufheizrate kontrolliert werden, um thermische Spannungen und das Risiko von Rissen während des Schweißens zu verringern; S3: Anpassung der Laserwellenlänge, der Fokusposition, der Scangeschwindigkeit und des Pulsmodus; S4: Echtzeitüberwachung des Schweißprozesses mithilfe von Infrarot-Thermografie und optischen Sensoren sowie dynamische Anpassung der Parameter durch ein geschlossenes Regelsystem, um die Stabilität des Schmelzbades und die Konsistenz der Schweißnaht sicherzustellen; S5: Kontrolle der Abkühlgeschwindigkeit und Durchführung notwendiger Glühbehandlungen. Durch die Optimierung der Materialauswahl, die präzise Steuerung der Laserparameter und die Echtzeitüberwachung mit Rückkopplung verbessert die Erfindung die mechanischen Eigenschaften und die Stabilität der Schweißverbindungen von hochgekohtem Stahl erheblich.

Ein Verfahren zur hochfrequenten Laserpräzisionsschweißung von hochgekohtem Stahl mit kontrollierter lokaler Wärmebehandlung ^{LU600007}

Technischer Bereich

Die Erfindung betrifft das Gebiet der Schweißtechnik und bezieht sich konkret auf ein Verfahren zur hochfrequenten Laserpräzisionsschweißung von hochgekohtem Stahl mit kontrollierter lokaler Wärmebehandlung.

Technologie im Hintergrund

Hochkohlenstoffstahl wird aufgrund seiner hervorragenden Härte und Festigkeit in der Fertigungsindustrie häufig eingesetzt, z. B. als Werkzeugstahl und Formenstahl. Sein hoher Kohlenstoffgehalt (0,6 – 0,9 %) führt jedoch dazu, dass während des Schweißprozesses harte und spröde Karbide sowie gehärtete Strukturen entstehen, was wiederum zu Rissen und anderen Schweißfehlern führt. Dies wird durch komplexe Phasenumwandlungen verursacht, die bei hoher Erwärmung und anschließender schneller Abkühlung auftreten. Typischerweise kommt es zur Bildung von Martensit und zu Schweißrissen aufgrund von inneren Spannungen. Traditionelle Schweißverfahren wie Gasschweißen oder Lichtbogenschweißen stoßen bei der Anwendung auf Hochkohlenstoffstahl auf erhebliche Herausforderungen, die sich hauptsächlich in den folgenden Punkten zeigen:

1. Hohe Rissempfindlichkeit: Kalte Risse: Hochkohlenstoffstahl enthält einen hohen Anteil an Kohlenstoff und anderen Legierungselementen (wie Mangan und Chrom), was während des Schweißprozesses leicht zur Bildung von harter und spröder Martensit-Phase führt. Diese Phasenumwandlung erzeugt erhebliche innere Spannungen, die besonders während des Abkühlens nach dem Schweißen zur Entstehung von Kaltrissen führen. Diese Risse beeinträchtigen die strukturelle Integrität und Lebensdauer der Schweißverbindung erheblich. Heiße Risse: Während des Schweißprozesses bei Hochkohlenstoffstahl kann die durch plötzliche Temperaturänderungen entstehende Spannung auch heiße Risse verursachen. Heiße Risse entstehen typischerweise während des Schweißens aufgrund ungleichmäßiger Abkühlung und Schrumpfung, die durch die Fließfähigkeit des flüssigen Metalls bei hohen Temperaturen verursacht werden.

2. Probleme bei der Kontrolle der Wärmeeinflusszone (WEZ): Aufgrund seiner geringen Zähigkeit und hohen Härte bildet sich beim Schweißen von Hochkohlenstoffstahl oft eine große und schwer kontrollierbare Wärmeeinflusszone. Die Struktur der WEZ kann aus gehärtetem Martensit und spröden Karbiden bestehen, was das Risiko von spröden Brüchen erhöht. Bestehende Schweißtechniken (wie manuelles Lichtbogenschweißen oder Gasschutzschweißen) können den Wärmeeintrag nicht präzise kontrollieren, um die Größe der Wärmeeinflusszone und die Bildung ungleichmäßiger Strukturen zu minimieren.

3. Unvorteilhafte Mikrostruktur: Nach dem Schweißen neigt Hochkohlenstoffstahl zur Bildung grober Körner und ungleichmäßiger Ausscheidungsphasen, was die mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung erheblich reduziert. Traditionelle Nachwärmebehandlungen reichen oft nicht aus, um die Mikrostruktur der Schweißnaht und der angrenzenden Bereiche zu verfeinern, wodurch die gewünschten Leistungsparameter (wie Härte und Zähigkeit) nicht erreicht werden können.

Inhalt der Erfindung

Der Zweck der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Verfahren zur hochfrequenten Laserpräzisionsschweißung von hochgekohtem Stahl mit kontrollierter lokaler Wärmebehandlung bereitzustellen. Durch die Optimierung der Materialauswahl, die präzise Steuerung der Laserparameter und die Echtzeitüberwachung mit Rückkopplung werden die

mechanischen Eigenschaften und die Stabilität der hochfrequenten Laser-Schweißverbindungen von hochgekohtem Stahl erheblich verbessert.

Um das oben genannte technische Ziel zu erreichen und die beschriebenen Effekte zu erzielen, wird die Erfindung durch die folgenden technischen Lösungen verwirklicht:

Ein Verfahren zur hochfrequenten Laserpräzisionsschweißung von hochgekohtem Stahl mit kontrollierter lokaler Wärmebehandlung umfasst die folgenden Schritte:

S1: Materialvorbereitung und Oberflächenbehandlung: Auswahl von hochgekohtem Stahl, der einer präzisen metallurgischen Verarbeitung unterzogen wurde. Oberflächenverunreinigungen werden durch chemische Reinigung und mechanische Aufrauung entfernt, um die Laserabsorption und die Schweißqualität zu verbessern.

S2: Lokale Wärmebehandlung: Vor dem Schweißen wird eine Laser-Vorwärmung durchgeführt, wobei Temperatur und Aufheizrate kontrolliert werden, um thermische Spannungen und das Risiko von Rissen während des Schweißens zu reduzieren.

S3: Optimierung der Laser-Schweißparameter: Durch die Anpassung von Laserwellenlänge, Fokusposition, Scangeschwindigkeit und Pulsmodus wird eine effiziente Energieabsorption und präzise Steuerung erreicht, sodass die Tiefe und Breite der Schweißnaht geeignet sind.

S4: Echtzeitüberwachung und Rückkopplungsregelung: Mithilfe von Infrarot-Thermografie und optischen Sensoren wird der Schweißprozess in Echtzeit überwacht. Durch ein geschlossenes Regelsystem werden die Parameter dynamisch angepasst, um die Stabilität des Schmelzbades und die Konsistenz der Schweißnaht sicherzustellen.

S5: Nachwärmebehandlung: Die Abkühlgeschwindigkeit wird gesteuert und erforderliche Glühbehandlungen werden durchgeführt, um die während des Schweißens entstandenen Restspannungen zu beseitigen und die Mikrostruktur der Schweißnaht zu verbessern.

S6: Qualitätsprüfung: Die innere Integrität und die mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht werden durch zerstörungsfreie Prüfungen und mechanische Tests umfassend bewertet, um sicherzustellen, dass die Designstandards erfüllt werden.

Die vorteilhaften Effekte der vorliegenden Erfindung:

Durch die Auswahl von hochgekohtem Stahl mit hervorragenden metallurgischen Eigenschaften und einem geringen Anteil schädlicher Verunreinigungen wird die Zähigkeit und Festigkeit der Schweißverbindung erheblich verbessert. Im Materialvorbereitungsprozess wird die chemische Zusammensetzung des Stahls mittels Spektralanalyse präzise geprüft, um sicherzustellen, dass die chemischen Bestandteile des Stahls im idealen Bereich liegen. Dies ist entscheidend, um die übermäßige Bildung spröder Phasen während des Schweißens zu minimieren. Die Oberflächenbehandlung verbessert die Absorption der Laserenergie durch das Material. Durch das Entfernen von Oxidschichten und Fetten sowie das mechanische Schleifen wird die optimale Oberflächenrauheit (Ra-Wert zwischen 1,6 – 3,2 µm) erreicht. Dies verhindert effektiv die Entstehung von Poren und Einschlüssen während des Schweißprozesses und schafft die Grundlage für eine effiziente Energiekopplung und -übertragung in der anschließenden Laser-Schweißphase.

Die vor dem Schweißen durchgeführte Laser-Vorwärmung reduziert nicht nur den Temperaturgradienten und die thermischen Spannungen während des Schweißens, sondern optimiert auch die Mikrostruktur durch ein präzises Temperaturdesign (z. B. eine Aufheizrate von 15 ° C/min und eine Vorwärmtemperatur von 780 ° C). Die Bildung und Stabilisierung des Austenitbereichs ist entscheidend, um die Härtetendenz von hochgekohtem Stahl zu vermeiden.

Durch die lokale Wärmebehandlung wird der Auflösungsgrad der Karbide und die

Gleichmäßigkeit des Austenits kontrolliert, um einen korrekten Phasenumwandlungspfad nach dem Schweißen sicherzustellen. Dadurch entsteht ein feines, gleichmäßig verteiltes Perlit- und Ferritgefüge, was die Zähigkeit und Rissbeständigkeit der Schweißnaht erhöht. Das gesamte Wärmebehandlungsdesign basiert auf der Kombination der thermophysikalischen Eigenschaften des Materials und moderner theoretischer Grundlagen, wodurch optimale mechanische Eigenschaften der Schweißnaht gewährleistet werden.

Durch die präzise Steuerung von Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit und Fokusposition wird während des Schweißprozesses eine optimale Abstimmung von Einbrandtiefe und -breite erreicht, was die Festigkeit und Qualität der Materialverbindung maximiert. Die Optimierung der Laserparameter berücksichtigt die Wärmeleitfähigkeit und den Schmelzpunkt von hochgekohtem Stahl, um einen angemessenen Energieeintrag sicherzustellen und Überhitzung oder unzureichende Erwärmung zu vermeiden. Der Einsatz eines gepulsten Modus gewährleistet, dass jede Laserwirkung präziser ist und der Schweißprozess stabiler abläuft. Ein angemessiger Schutzgasfluss verhindert nicht nur die Oxidation, sondern kontrolliert auch die Abkühlgeschwindigkeit, um eine ideale Mikrostruktur in der Schweißzone zu gewährleisten. Die Kontrolle des Energieeintrags erfolgt durch präzise Berechnungen (z. B. $Q = P / V$), wodurch die Schweißverbindung eine überlegene Struktur und Leistung erhält.

Durch die Integration von Echtzeit-Überwachungstechnologien wie Infrarot-Temperaturmessung, Laserleistungssensorik und visueller Überwachung wird eine dynamische Steuerung des gesamten Schweißprozesses erreicht. Die Erfassung von Echtzeitdaten und intelligente Rückkopplungsmechanismen stellen sicher, dass Temperatur, Leistung und Nahtform stets im idealen Bereich liegen. Bei Abweichungen der Parameter von den Sollwerten reagiert das System schnell, z. B. durch Reduzierung der Laserleistung zur Vermeidung von Überhitzung oder durch Anpassung der Schweißgeschwindigkeit zur Korrektur von Nahtabweichungen. Durch die Einführung eines Faltungsneuronalen Netzwerks zur Schweißnahtbildanalyse und eines Fuzzy-Control-Systems werden intelligente Korrekturen und Optimierungen durchgeführt, wodurch die Qualität und Konsistenz des gesamten Schweißprozesses erheblich verbessert werden. Die Anwendung des umfassenden Rückkopplungssystems ermöglicht die Etablierung einer effizienten und zuverlässigen Regelung für jeden Schweißprozess und gewährleistet die Ausgabe von Schweißnähten mit höchsten Qualitätsstandards.

Selbstverständlich muss ein Produkt, das die vorliegende Erfindung implementiert, nicht unbedingt alle der oben genannten Vorteile gleichzeitig erfüllen.

Detaillierte Beschreibung

Nachfolgend wird der technische Lösungsansatz in den Ausführungsbeispielen der vorliegenden Erfindung klar und vollständig beschrieben. Es ist offensichtlich, dass die beschriebenen Ausführungsbeispiele lediglich einen Teil der Erfindung darstellen und nicht alle Ausführungsbeispiele umfassen. Auf der Grundlage der in der Erfindung beschriebenen Ausführungsbeispiele fallen alle anderen Ausführungsbeispiele, die von Fachleuten auf diesem Gebiet ohne kreativen Aufwand erzielt werden, in den Schutzbereich der vorliegenden Erfindung.

Ausführungsbeispiel 1

Das in diesem Ausführungsbeispiel beschriebene Verfahren zur hochfrequenten Laserpräzisionsschweißung von hochgekohtem Stahl mit kontrollierter lokaler Wärmebehandlung umfasst die folgenden Schritte:

Materialvorbereitung und Oberflächenbehandlung

Hochkohlenstoffstahl neigt während des Schweißprozesses zur Rissbildung, was auf seinen hohen Kohlenstoffgehalt und mögliche Legierungselemente (wie Mangan, Chrom usw.) zurückzuführen ist. Diese Elemente neigen dazu, bei hohen Temperaturen harte und spröde Karbide zu bilden. Daher sollte bei der Materialauswahl auf hochkohlenstoffhaltigen Stahl geachtet werden, der einer sorgfältigen metallurgischen Verarbeitung unterzogen wurde, um den Gehalt an schädlichen Verunreinigungen zu reduzieren. Die Oberflächenreinigung durch Entfernen von Oxidschichten und Fetten verbessert die Zuverlässigkeit der Schweißverbindung, da Verunreinigungen Poren oder Einschlüsse in der Schweißnaht verursachen können. Vorbehandlungen wie Sandstrahlen oder mechanisches Schleifen erhöhen die Oberflächenrauheit, verbessern die Absorption der Laserenergie und ermöglichen eine gleichmäßigere Erwärmung und bessere Schweißqualität.

Lokale Wärmebehandlung

Vor dem Schweißen wird eine Laser-Vorwärmung durchgeführt. Dieser Prozess reduziert effektiv den Temperaturgradienten und die thermischen Spannungen während des Schweißens und verringert so das Risiko der Rissbildung. Das Design der lokalen Wärmebehandlung muss die thermophysikalischen Eigenschaften und die geometrische Form des Materials berücksichtigen. Es erfordert eine präzise Kontrolle des Temperaturgradienten und der Aufheizrate, um die gewünschte mikrostrukturelle Veränderung zu erreichen. Eine optimale Vorwärmtemperatur ist entscheidend, um die Härtetendenz zu reduzieren und die Härte nach dem Schweißen effektiv zu kontrollieren.

Optimierung der Laser-Schweißparameter

Die Wahl der geeigneten Laserwellenlänge stellt sicher, dass die Energie effizient absorbiert wird, wobei die optischen Eigenschaften des hochgekohlten Stahls zu berücksichtigen sind. Durch die Anpassung der Fokusposition kann der Energieeintrag des Lasers optimiert werden, sodass er sich auf die Schweißlinie konzentriert und das Verhältnis von Schweißnahttiefe zu -breite sowie die Schweißeffizienz verbessert werden. Die Scangeschwindigkeit beeinflusst direkt die Wärmeeinbringung: Eine hohe Scangeschwindigkeit reduziert die Breite der Wärmeeinflusszone, aber eine zu hohe Geschwindigkeit kann zu einer diskontinuierlichen Schweißnaht führen. Der Einsatz des Pulsmodus verbessert die Präzision des Schweißens. Durch die Steuerung von Pulsfrequenz und -energie kann die Wirkung jedes einzelnen Laserpulses genau eingestellt werden, wodurch der Schweißprozess kontrollierbarer und stabiler wird.

Echtzeitüberwachung und Rückkopplungsregelung

Durch den Einsatz fortschrittlicher Infrarot-Thermografie und optischer Sensoren ermöglicht die Echtzeitüberwachung des Schweißprozesses die Bereitstellung dynamischer Temperaturverteilungsdaten. Diese Daten bilden die Grundlage für die Anpassung der Laserleistung und Scangeschwindigkeit. Das Rückkopplungskontrollsystem analysiert die vom Sensor erhaltenen Daten mithilfe von Algorithmen und passt die Schweißparameter schnell an, um eine stabile Schweißnahtqualität sicherzustellen. Ein solches geschlossenes Regelungssystem kann während des Schweißprozesses negative Trends aktiv korrigieren, wodurch die Zuverlässigkeit und Konsistenz der Produktion erhöht wird.

Nachwärmebehandlung

Eine langsame Abkühlung reduziert die beim schnellen Abkühlen nach dem Schweißen entstehenden inneren Spannungen. Diese Spannungen sind eine der Hauptursachen für Risse bei hochgekohltem Stahl. Für bestimmte hochgekohlte Stähle ist eine nachträgliche Glühbehandlung notwendig. Die Glühtemperatur und -zeit müssen entsprechend dem Phasendiagramm des spezifischen Materials festgelegt werden, um die beim Schweißen entstandenen Restspannungen

zu beseitigen und die Mikrostruktur der Schweißnaht sowie der angrenzenden Bereiche zu verbessern. LU600007

In diesem Ausführungsbeispiel umfasst Schritt S1 konkret:

S1.1: Materialauswahl: Der Kohlenstoffgehalt liegt zwischen 0,6 % und 0,9 %, der Mangangehalt zwischen 0,3 % und 0,6 %, da der Kohlenstoffgehalt die Härte und Sprödigkeit des Stahls sowie die Wärmebehandlungseffekte während des Schweißens direkt beeinflusst. Hochpräzise Spektralanalysegeräte (wie ICP-OES) werden zur Überprüfung der chemischen Zusammensetzung des Stahls verwendet. Dies stellt sicher, dass die Elementverhältnisse im akzeptablen Bereich liegen, um die übermäßige Bildung spröder Phasen wie Eisenkarbide (Fe_3C) während des Schweißens zu vermeiden.

S1.2: Oberflächenreinigung: Durch die Kombination chemischer und mechanischer Methoden werden Fette, Oxidschichten und andere Verunreinigungen entfernt. Die chemische Reinigung erfolgt mit einer industriellen NaOH-Lösung bei einer Konzentration von 7 – 9 %, wobei die Einweichzeit strikt auf 15 Minuten begrenzt ist, um eine vollständige Entfernung von Fetten und Oxiden zu gewährleisten. Anschließend muss die Oberfläche mehrfach mit hochreinem Wasser gespült werden, um Rückstände der Lauge zu entfernen. Die Wirksamkeit der Oberflächenreinigung wird durch die Kontaktwinkelmessung geprüft. Es wird ein Kontaktwinkel nahe 0° gefordert, was zeigt, dass die Oberfläche vollständig benetzbar ist und die Reinigung den Anforderungen entspricht.

S1.3: Oberflächenrauheitsbehandlung: Mit Schleifpapier der Körnung 120 – 240 wird die Oberfläche gleichmäßig aufgeraut, um die Oberflächenrauheit zu erhöhen und so die Absorption der Laserenergie zu verbessern. Die Oberflächenrauheit wird mit einem Rauheitsmessgerät überprüft, wobei der R_a -Wert im Bereich von $1,6 - 3,2 \mu\text{m}$ liegen muss, um eine optimale Laserabsorption sicherzustellen. Eine zu hohe oder zu niedrige Rauheit würde die Wechselwirkung zwischen Laser und Material beeinträchtigen, daher ist eine strenge Kontrolle erforderlich.

S1.4: Oxidschichtbehandlung: Die Behandlung erfolgt durch mechanisches Polieren oder Säurebeizen mit verdünnter Salzsäure bei einer Konzentration von 5 %. Die Einweichzeit ist auf 5 Minuten begrenzt. Dadurch werden Eisenoxide auf der Oberfläche effektiv entfernt, um die Fließfähigkeit und die Bindungseigenschaften des Schmelzbades während des Schweißens nicht zu beeinträchtigen. Die Dicke der verbleibenden Oxidschicht wird mittels Röntgenbeugung analysiert und muss weniger als $0,05 \mu\text{m}$ betragen.

In diesem Ausführungsbeispiel umfasst Schritt S2 konkret:

S2.1: Aufheizphase: Der Schweißbereich des hochgekohten Stahls wird auf eine bestimmte Temperatur T erwärmt, um die Austenitisierung zu erreichen. Die gewählte Temperatur T beträgt 780°C , was leicht über dem kritischen Punkt A_1 (727°C) liegt. Diese Wahl basiert auf dem Gleichgewichtsphasendiagramm des Materials und stellt sicher, dass Karbide bei dieser Temperatur vollständig gelöst und eine gleichmäßige Austenitstruktur gebildet wird. Um die Aufheizrate R_h zu kontrollieren, wird die Formel $R_h = (T - T_0) / t_h$ verwendet, wobei T_0 die

Anfangstemperatur (Raumtemperatur) und t_h die erforderliche Aufheizzeit ist. R_h wird auf 15°

C/min eingestellt, um einen gleichmäßigen Temperaturanstieg zu gewährleisten und die Entstehung von thermischen Spannungen und Strukturungleichmäßigkeiten zu verhindern.

S2.2: Haltephase: Nach Erreichen der Zieltemperatur wird eine konstante Haltebehandlung durchgeführt. Die Haltezeit wird auf 20 Minuten festgelegt. Die Berechnungsformel für die

Haltezeit lautet:

$$t_{hb} = C \cdot d$$

Dabei ist C eine Konstante, die 4 Minuten pro Millimeter beträgt, und d die Schweißnahtdicke. Für einen Schweißbereich mit einer Dicke von 5 Millimetern beträgt die Haltezeit 20 Minuten.

- 5 Ziel dieser Phase ist es, eine gleichmäßige Austenitstruktur zu gewährleisten und die vollständige Auflösung der Karbide sicherzustellen. Durch diese Behandlung erreicht das Gefüge des Materials einen thermodynamisch stabilen Zustand, wodurch Spannungen aufgrund von Phasenumwandlungen während des anschließenden Abkühlens reduziert werden.

- 10 S2.3: Langsame Abkühlung: Nach der Haltephase erfolgt eine langsame Abkühlung, um eine Martensitbildung und die damit einhergehende Versprödung des Materials zu verhindern. Die Abkühlrate R_c wird mithilfe der Formel $R_c = (T - T_f) / t_c$ gesteuert, wobei T_f die Endtemperatur (in der Regel Raumtemperatur) und t_c die Abkühlzeit ist. Die Abkühlrate R_c muss streng auf 7°

- 15 C/min kontrolliert werden. Durch die Kontrolle dieser langsamen Abkühlrate kann die Bildung eines feinen Perlit- und Ferritgefüges im Schweißbereich gefördert werden. Diese Phasen verbessern die Zähigkeit der Schweißnaht und die gesamte mechanische Leistung.

- 20 S2.4: Mikrostrukturanalyse und Härteprüfung: Nach der Wärmebehandlung muss die Mikrostruktur des Schweißbereichs mithilfe eines Mikroskops analysiert werden, um das Verhältnis und die Verteilung von Perlit, Ferrit und die Gleichmäßigkeit der Karbide zu bestätigen. Zudem wird eine Härteprüfung durchgeführt, in der Regel mit einem Brinell-Härteprüfgerät. Der Zielwert der Härte sollte bei 220 HBW liegen. Diese Härte gewährleistet, dass der Schweißbereich die notwendige Zähigkeit und Rissbeständigkeit unter Lastbedingungen aufweist.

- 25 S2.5: Spannungsabbau: Eine niedrigtemperierte Spannungsabbau-Behandlung wird durchgeführt. Die Schweißbaugruppe wird auf 200°C erhitzt und 1 Stunde lang gehalten. Dies hilft, die inneren Spannungen zu reduzieren und die Zersetzung von unvollständig umgewandeltem Austenit zu fördern. Diese Behandlung verbessert die Stabilität des Schweißbereichs und verhindert Verformungen und Versagen im späteren Einsatz.

In diesem Ausführungsbeispiel umfasst Schritt S3 konkret:

- 30 S3.1: Einstellung der Laserleistung: Die Laserleistung wird basierend auf den physikalischen Eigenschaften des Materials festgelegt. Für hochgekohten Stahl wird die Wärmeleitfähigkeit (50 W/mK) berücksichtigt. Die erforderliche Laserleistung wird mithilfe der Formel $P = k \cdot A \cdot (T_m - T_1)$ berechnet, wobei A die vorgesehene Schmelzbadsfläche, T_m der Schmelzpunkt des Materials

(1535°C) und T_1 die Umgebungstemperatur (25°C) ist. Diese Einstellung stellt sicher, dass das Material während des Schweißens vollständig aufgeschmolzen wird, ohne zu überhitzen.

- 35 S3.2: Bestimmung der Schweißgeschwindigkeit: Die Schweißgeschwindigkeit V wird abhängig von der Materialdicke und der erforderlichen Schweißenergie eingestellt. Die Formel lautet: $V = E / (P \cdot t)$ Dabei ist E die benötigte Energie pro Längeneinheit, P die Laserleistung und t die Materialdicke. Die berechnete Geschwindigkeit wird zur Einstellung der Schweißausrüstung verwendet, um einen stabilen Schweißprozess sicherzustellen und Schweißfehler zu vermeiden.

S3.3: Anpassung der Fokusposition: Die Fokusposition Z_f des Lasers beeinflusst die

Schmelztiefe und -breite. Sie wird präzise durch die Formel $Z_f = f + \Delta f$ festgelegt, wobei f die

Brennweite des Lasersystems und Δf die experimentell ermittelte Fokuskorrektur ist. Dies stellt sicher, dass die Laserenergie auf die Schweißoberfläche oder leicht darunter konzentriert wird, um die Materialauflösung und die Verbindungseigenschaften zu optimieren.

5 S3.4: Einstellung des Schutzgasflusses: Das Schutzgas verhindert die Oxidation der Schweißnaht während des Schweißens und sorgt für eine moderate Abkühlgeschwindigkeit. Der Schutzgasfluss F_g wird mit der Formel $F_g = C_g \cdot S$ berechnet, wobei C_g der Gasflusskoeffizient (L/min) und S die Schweißgeschwindigkeit ist. Der Fluss wird experimentell optimiert, um Oberflächendefekte zu vermeiden.

10 S3.5: Kontrolle des Wärmeeintrags: Der Wärmeeintrag Q wird durch die Formel $Q = P / V$ präzise gesteuert, wobei P die Laserleistung und V die Schweißgeschwindigkeit ist. Diese Steuerung stellt eine gleichmäßige Wärmeverteilung während des Schweißens sicher. Ein angemessener Wärmeeintrag gewährleistet, dass die Mikrostruktur der Schweißnaht den idealen Zustand erreicht und gute mechanische Eigenschaften aufweist.

15 In diesem Ausführungsbeispiel umfasst Schritt S4 konkret:

S4.1: Datenerfassung und Sensoranordnung: Temperaturmesssensoren, Kamera und Überwachungseinrichtungen und Lasersensoren werden an der Schweißstelle und deren Umgebung platziert, um Temperatur-, Bild- und Leistungsdaten während des Schweißprozesses zu erfassen. Die Datenerfassungsfrequenz wird basierend auf der Schweißgeschwindigkeit und den dynamischen Veränderungen des Schmelzbades auf 1000 Abtastungen pro Sekunde eingestellt, um eine hochpräzise Echtzeitüberwachung zu gewährleisten.

20 S4.2 Temperaturüberwachung und Rückkopplungsregelung: Mit einem Infrarot-Temperaturmessgerät wird die Temperatur T im Schweißbereich überwacht, um sicherzustellen, dass die Temperatur innerhalb des festgelegten Bereichs bleibt und Überhitzung oder unzureichende Erwärmung vermieden wird. Der Temperaturbereich ist festgelegt auf $T_{\min}$ bis $T_{\max}$, wobei $T_{\min}$ 1530 °C und $T_{\max}$ 1580 °C beträgt.

Wenn $T > T_{\max}$, wird die Laserleistung P reduziert, wobei die Anpassung durch $\Delta P = k_1 \cdot (T - T_{\max})$ erfolgt, wobei k_1 der Regelkoeffizient ist.

Wenn $T < T_{\min}$, wird die Laserleistung P erhöht, wobei die Anpassung durch $\Delta P = k_2 \cdot (T_{\min} - T)$ erfolgt, wobei k_2 der Regelkoeffizient ist.

30 S4.3 Schweißnaht-Überwachung: Eine hochauflösende Kamera erfasst in Echtzeit Bilder des Schmelzbades, die anschließend mithilfe eines Faltungsneuronalen Netzwerks (CNN) analysiert werden. Das CNN klassifiziert und erkennt Anomalien in der Form des Schmelzbades und der Schweißnaht. Durch das Training mit umfangreichen, annotierten Daten kann das CNN die unterschiedlichen Schweißnahtmerkmale präzise identifizieren und Abweichungen wie Nahtversatz oder unzureichende Schmelztiefe erkennen. Wenn durch die visuelle Überwachung

eine Abweichung der Schweißnahtform festgestellt wird, korrigiert das System diese mithilfe eines Fuzzy-Logik-Algorithmus (Fuzzy Logic Control) in Echtzeit. Der Fuzzy-Controller bewertet die Abweichungen zwischen den CNN-Ausgabedaten und den idealen Schweißnahtdaten und nimmt umfassende Anpassungen der Laserfokusposition und Schweißgeschwindigkeit vor. Die Fuzzy-Regelbasis wird basierend auf verschiedenen Schweißbedingungen aufgebaut und ermöglicht eine flexible Anpassung an komplexe Veränderungen der Schweißnahtform.

S4.4 Laserleistungsüberwachung und -anpassung: Ein Laserleistungssensor überwacht in Echtzeit die Laserleistung und stellt sicher, dass die Schwankungen innerhalb des festgelegten engen Bereichs liegen. Falls die überwachte Abweichung ΔP den Feinabstimmungsbereich überschreitet, passt das Steuerungssystem den Laseroutput automatisch mithilfe eines adaptiven Regelungsalgorithmus in Echtzeit an, sodass die Laserleistung stabil auf dem Zielwert gehalten wird.

S4.5 Integrierte Rückkopplungsregelung: Über das verteilte Steuerungssystem werden die Schweißparameter analysiert und sofort angepasst. Wenn die Parameter von den Qualitätsstandards abweichen, wird die Priorität der Korrekturen mithilfe eines Algorithmus bestimmt, und Laserleistung sowie Schweißgeschwindigkeit werden aktualisiert. Die spezifischen Aktualisierungsformeln lauten: $P_{\text{new}} = P_{\text{old}} + \Delta P$ und $S_{\text{new}} = S_{\text{old}} + \Delta S$. Die Anpassungseffekte werden automatisch aufgezeichnet und die Daten an das Steuerungssystem zurückgemeldet, um nachfolgende Schweißprozesse zu optimieren. Dieses präzise Echtzeit-Überwachungs- und Rückkopplungssystem gewährleistet eine hohe Qualität und Konsistenz des Schweißprozesses.

In diesem Ausführungsbeispiel umfasst der Schritt S5:

S5.1 Vorwärmbehandlung: Reduzierung des Temperaturgradienten während der Nachwärmebehandlung, um die Entstehung von thermischen Spannungen zu verringern. Die Vorwärmtemperatur T_{pre} wird auf 600°C und die Zeit t_{pre} auf 30 Minuten festgelegt. In dieser Phase wird ein Temperaturkontrollgerät eingesetzt, um sicherzustellen, dass die Temperatur des gesamten Werkstücks gleichmäßig erreicht wird. Die Temperaturüberwachung erfolgt mit einem Thermoelement vom Typ K. Wenn die überwachte Temperaturabweichung $\Delta T > \pm 5^\circ \text{C}$ beträgt, wird die Heizleistung P des Gerätes angepasst. Die Anpassung erfolgt gemäß der Formel:

$P_{\text{new}} = P_{\text{old}} + k \cdot \Delta T$, wobei k der Regelkoeffizient ist, um die Zieltemperatur schnell wiederherzustellen.

S5.2 Hauptwärmebehandlung: Durch geeignete Temperatur- und Zeitparameter wird eine Ausscheidungshärtung und Rekristallisationsbehandlung der Schweißnaht durchgeführt. Die Zieltemperatur T_{main} wird auf 950°C und die Haltezeit t_{main} auf 1 Stunde festgelegt. Die Temperatursteuerung erfolgt mittels PID-Regelalgorithmus, um die konstante Behandlungstemperatur aufrechtzuerhalten. Die PID-Regelparameter sind wie folgt festgelegt: Proportionalband $K_p = 1,5$, Integrationszeit $T_i = 10$ Sekunden und Differenzialzeit $T_d = 1$ Sekunde. Während des Aufheizprozesses muss die Temperaturanstiegsrate dT/dt auf unter 10°C/min kontrolliert werden, um thermische Schocks zu vermeiden.

S5.3 Langsame Abkühlung: Verhinderung der Kornvergrößerung und der erneuten

Entstehung unerwünschter innerer Spannungen. Die Abkühlrate wird auf 5°C/min festgelegt, bis die Werkstücktemperatur Raumtemperatur erreicht. Während der Abkühlung wird die Strömung des Kühlmediums (einschließlich Stickstoff oder Luft) mithilfe eines Durchflussregelventils fein abgestimmt. Die Regelungsformel für die Kühlrate lautet: $R_{\text{new}} = R_{\text{old}}$

- 5 $\pm m \cdot \Delta T$, wobei m der Durchflussregelkoeffizient und ΔT der Unterschied zwischen der aktuellen Temperatur und der Zieltemperatur ist.

S5.4 Qualitätstests: Durchführung von Härteprüfungen, Mikrostrukturanalysen und Messungen der Eigenspannung. Die Härtemessung erfolgt mithilfe eines Vickers-Härteprüfgeräts, wobei die Härtewerte HV aufgezeichnet werden und die Norm $HV_{\min} \leq HV \leq HV_{\max}$ erfüllen

- 10 müssen. Die Mikrostruktur wird mit einem metallographischen Mikroskop untersucht, um festzustellen, ob es zu unzureichender Kornbindung oder ungleichmäßiger Ausscheidungsverteilung kommt. Die Eigenspannung wird durch die Röntgenbeugungsmethode gemessen, wobei die Ergebnisse innerhalb des voreingestellten Grenzbereichs von $\pm 50 \text{ MPa}$ liegen müssen.

15 Ausführungsbeispiel 2

Das in diesem Ausführungsbeispiel beschriebene Verfahren zur hochfrequenten Laserpräzisionsschweißung von hochgekohtem Stahl mit kontrollierter lokaler Wärmebehandlung umfasst zusätzlich die folgenden Schritte:

Qualitätstests

- 20 Zerstörungsfreie Prüfverfahren wie Ultraschall- oder Röntgenprüfung ermöglichen die Bewertung der inneren Struktur der Schweißnaht, ohne das Werkstück zu beschädigen. Dabei können mögliche Defekte wie Poren, Einschlüsse und Risse erkannt werden. Die Analyse der Mikrostruktur ist ein wichtiger Bestandteil der Materialwissenschaft. Durch die Beobachtung des Mikrogefüges im Schweißbereich mithilfe eines metallographischen Mikroskops lässt sich der Einfluss des Schweißprozesses auf die Mikrostruktur des Materials beurteilen. Mechanische Prüfungen sind ein entscheidender Schritt zur Sicherstellung der Schweißqualität und -sicherheit. Diese Tests überprüfen, ob die Festigkeit, Zähigkeit und Duktilität der Schweißnaht den Konstruktionsanforderungen entsprechen.

Ergebnisrückmeldung und Prozessoptimierung

- 30 Nach Abschluss des gesamten Schweißprozesses müssen alle Parameter und Testergebnisse systematisch aufgezeichnet werden. Diese Daten dienen nicht nur zur Bestätigung der Qualität des spezifischen Werkstücks, sondern liefern auch eine Grundlage für zukünftige Prozessverbesserungen. Durch kontinuierliche Datenanalyse und Rückmeldung kann der Schweißprozess kontinuierlich optimiert werden, insbesondere hinsichtlich der Anpassung der Laserparameter und der lokalen Wärmebehandlung. Dies stellt sicher, dass der Prozess den Anforderungen unterschiedlicher Produktionsumgebungen und Materialien gerecht wird.

In diesem Ausführungsbeispiel umfasst die Qualitätserprüfung konkret Folgendes:

- 40 Zunächst wird eine Härteprüfung durchgeführt. Ein Vickers-Härteprüfgerät wird verwendet, um die Härte an mehreren Punkten der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone zu messen. Die aufgebrachte Kraft beträgt $9,8 \text{ Newton}$, und an jedem Messpunkt wird die Länge der Eindruckdiagonale d aufgezeichnet. Die Härte wird mit der Formel $HV = 1.854 \times F / d^2$

berechnet, wobei F die aufgebrachte Kraft von 9,8 Newton und d die Länge der Eindruckdiagonale ist. Die Härte an den Messpunkten muss im Bereich von 290 HV bis 320 HV liegen. Bei Abweichungen von diesem Bereich sind die Schweißprozessparameter wie Schweißgeschwindigkeit oder Stromstärke zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen, gefolgt von einer erneuten Wärmebehandlung.

Anschließend wird eine Mikrostrukturanalyse durchgeführt. Nach dem Polieren und Ätzen der Probe wird die Mikrostruktur der Schweißnaht unter einem metallographischen Mikroskop mit 1000-facher Vergrößerung beobachtet. Es sollten gleichmäßige äquiaxiale Körner und eine angemessene Menge feiner Ausscheidungen zu sehen sein, die gleichmäßig verteilt sind, ohne dass eine abnormale Korngrenzenausdehnung auftritt. Falls grobe Körner oder eine Anhäufung von Ausscheidungen beobachtet werden, muss überprüft werden, ob die Parameter der Nachwärmebehandlung korrekt eingehalten wurden, wie z. B. die Haltezeit von 1 Stunde bei 950 °C. Bei Bedarf werden die Parameter der Nachwärmebehandlung optimiert, um die Mikrostruktur zu verbessern.

Darauf folgt die Messung der Eigenspannung mithilfe der Röntgenbeugungsmethode. Die Schweißnaht wird mit Röntgenstrahlen bestrahlt, und die Verschiebung des Beugungswinkels $\Delta 2\theta$ wird gemessen, um die Änderung des Gitterabstands zu bestimmen. Die Eigenspannung σ wird mit der Formel $\sigma = E / (1 + \nu) \cdot \Delta d / d$ berechnet, wobei E der Elastizitätsmodul des Materials

(MPa), ν die Poissonzahl, Δd die Änderung des Gitterabstands und d der ursprüngliche Gitterabstand ist. Die gemessene Eigenspannung muss im Bereich von -50 MPa bis 50 MPa liegen. Liegen die Werte außerhalb dieses Bereichs, müssen die Schweißparameter angepasst oder eine Spannungsabbau-Glühbehandlung durchgeführt werden.

Alle oben genannten Messergebnisse werden gesammelt und ausgewertet, um einen Prüfbericht zu erstellen. Die Einhaltung der festgelegten Standards für Härte, Mikrostruktur und Eigenspannung ist ein Indikator für die Qualitätskonformität. Im Falle von Abweichungen werden die Ursachen der Abweichung detailliert analysiert, wie z. B. unzureichende Behandlungstemperaturen, unzureichende Haltezeiten oder Fehler in den Prozessparametern. Konkrete Maßnahmen wie eine erneute Wärmebehandlung oder die Optimierung der Prozessparameter werden ergriffen, um sicherzustellen, dass die Qualität der Schweißverbindungen den Konstruktionsanforderungen entspricht. Auf diese Weise wird durch sorgfältige Prüf- und Anpassungsschritte sichergestellt, dass die Schweißverbindungen in der Praxis zuverlässige Leistung und lange Lebensdauer aufweisen.

Nach der Analyse werden umgehend Maßnahmen zur Prozessanpassung ergriffen. Wenn Härteabweichungen festgestellt werden, kann der Wärmeeintrag durch Anpassung der Schweißspannung und des Schweißstroms sowie durch eine moderate Verringerung der Schweißgeschwindigkeit kontrolliert werden. Falls die Mikrostruktur nicht den Anforderungen entspricht, wird die Wärmebehandlungstemperatur und -zeit erneut angepasst, um eine gleichmäßige Korngrößenverteilung zu erreichen. Bei zu hohen Eigenspannungen muss durch eine Neufestlegung der Schweißreihenfolge oder die Hinzufügung geeigneter Spannungsabbau-Glühsschritte die Spannung reduziert werden.

Es werden Prozessverifizierungsexperimente nach den Anpassungen durchgeführt. Basierend

auf den aktualisierten Prozessparametern wird eine Reihe kleinerer Verifizierungsexperimente durchgeführt. Dabei wird sichergestellt, dass jede Messung – von der Härte über die Mikrostruktur bis hin zu den Eigenspannungen – den Konstruktionsstandards entspricht. Alle experimentellen Daten werden aufgezeichnet und die Wirksamkeit der Anpassungen bewertet.

- 5 Ein detaillierter Feedback-Bericht wird erstellt, der die Prüfergebnisse, den Analyseprozess, die Maßnahmen zur Prozessanpassung und die Ergebnisse der Verifizierungsexperimente vollständig dokumentiert. Dabei wird klar aufgezeigt, inwiefern die Qualitätsverbesserungen erzielt wurden und welchen konkreten Einfluss sie auf die Produktion haben. Dieser Bericht wird den relevanten Abteilungen zur Verfügung gestellt, um eine kontinuierliche Prozessoptimierung
- 10 sicherzustellen und die Schweißqualität weiter zu verbessern.

- Die oben beschriebenen bevorzugten Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung dienen lediglich der Erläuterung dieser Erfindung. Die bevorzugten Ausführungsbeispiele beschreiben nicht alle Details vollständig und beschränken die Erfindung nicht auf die spezifischen dargestellten Ausführungsarten. Es ist offensichtlich, dass auf Basis des Inhalts dieser
- 15 Beschreibung viele Modifikationen und Variationen vorgenommen werden können. Die Auswahl und detaillierte Beschreibung dieser Ausführungsbeispiele dient lediglich der besseren Erläuterung der Prinzipien und praktischen Anwendungen der Erfindung, sodass Fachleute auf diesem Gebiet die Erfindung gut verstehen und anwenden können. Die Erfindung ist ausschließlich durch die Ansprüche und deren gesamten Umfang sowie Äquivalente eingeschränkt.

1. Ein hochfrequentes Laserpräzisionsschweißverfahren für hochgekohten Stahl mit kontrollierter lokaler Wärmebehandlung, dadurch gekennzeichnet, dass es die folgenden Schritte umfasst:

S1: Materialvorbereitung und Oberflächenbehandlung: Auswahl von hochgekohtem Stahl, der einer präzisen metallurgischen Verarbeitung unterzogen wurde, und Entfernung von Oberflächenverunreinigungen durch chemische Reinigung und mechanische Aufrauung zur Verbesserung der Laserabsorption und Schweißqualität;

S2: Lokale Wärmebehandlung: Durchführung einer Laser-Vorwärmung vor dem Schweißen, wobei Temperatur und Aufheizrate kontrolliert werden, um thermische Spannungen und das Risiko von Rissen während des Schweißens zu reduzieren;

S3: Optimierung der Laser-Schweißparameter: Durch Anpassung von Laserwellenlänge, Fokusposition, Scangeschwindigkeit und Pulsmodus wird eine effiziente Energieabsorption und präzise Steuerung erreicht, um die geeignete Schweißnahttiefe und -breite sicherzustellen;

S4: Echtzeitüberwachung und Rückkopplungsregelung: Mithilfe von Infrarot-Thermografie und optischen Sensoren wird der Schweißprozess in Echtzeit überwacht, während die Parameter durch ein geschlossenes Regelungssystem dynamisch angepasst werden, um die Stabilität des Schmelzbades und die Konsistenz der Schweißnaht sicherzustellen;

S5: Nachwärmebehandlung: Kontrolle der Abkühlrate und Durchführung notwendiger Glühbehandlungen zur Beseitigung von Restspannungen nach dem Schweißen und zur Verbesserung der Mikrostruktur der Schweißnaht.

2. Das Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass es zusätzlich eine Qualitätsprüfung umfasst: Durch den Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren wie Ultraschall- oder Röntgenprüfungen wird die innere Struktur der Schweißnaht bewertet, ohne das Werkstück zu beschädigen, um mögliche Defekte wie Poren, Einschlüsse und Risse zu identifizieren; die Mikrostruktur im Schweißbereich wird mithilfe eines metallographischen Mikroskops untersucht, um den Einfluss des Schweißprozesses auf das Mikrogefüge des Materials zu bewerten; mechanische Prüfungen gewährleisten die Qualität und Sicherheit der Schweißnaht.

3. Das Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Qualitätsprüfung Folgendes umfasst:

Härteprüfung: Mit einem Vickers-Härteprüfgerät wird die Härte an mehreren Punkten der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone gemessen; die aufgebrachte Kraft beträgt 9,8 N, und die Länge der Eindruckdiagonale d wird an jedem Messpunkt aufgezeichnet. Die Härte wird mit der Formel $HV = 1,854 \times F / d^2$ berechnet, wobei F die aufgebrachte Kraft und d die Länge der Eindruckdiagonale ist. Die Härtewerte der Messpunkte müssen im Bereich von 290 HV bis 320 HV liegen. Bei Abweichungen müssen die Schweißparameter überprüft und gegebenenfalls angepasst werden, gefolgt von einer erneuten Wärmebehandlung;

Mikrostrukturanalyse: Nach dem Polieren und Ätzen der Probe wird die Mikrostruktur der Schweißnaht unter einem metallographischen Mikroskop bei 1000-facher Vergrößerung beobachtet. Es sollten gleichmäßige äquiaxiale Körner und eine angemessene Menge feiner Ausscheidungen zu sehen sein, die gleichmäßig verteilt sind und ohne abnormale Korngrenzenausdehnung vorliegen. Falls grobe Körner oder eine Anhäufung von Ausscheidungen festgestellt werden, muss überprüft werden, ob die Wärmebehandlungstemperatur und -haltezeit korrekt eingehalten wurden; falls erforderlich, werden die Parameter der Nachwärmebehandlung

optimiert, um die Mikrostruktur zu verbessern;

Messung der Eigenspannung: Die Schweißnaht wird mit Röntgenstrahlen bestrahlt, und die Verschiebung des Beugungswinkels $\Delta 2\theta$ wird gemessen, um die Änderung des Gitterabstands zu bestimmen. Die Eigenspannung σ wird mit der Formel $\sigma = E / (1 + \nu) \cdot \Delta d / d$ berechnet, wobei E der Elastizitätsmodul des Materials, ν die Poissonzahl, Δd die Änderung des Gitterabstands und d der ursprüngliche Gitterabstand ist. Die gemessene Spannung muss im Bereich von -50 MPa bis 50 MPa liegen. Bei Abweichungen müssen die Schweißparameter angepasst oder eine Spannungsabbau-Glühbehandlung durchgeführt werden;

Alle oben genannten Messergebnisse werden gesammelt und ausgewertet, und ein Prüfbericht wird erstellt. Die Einhaltung der Standards für Härte, Mikrostruktur und Eigenspannung ist ein Indikator für die Qualitätskonformität.

4. Wie in Anspruch 1 beschriebenes hochfrequentes Laserpräzisionsschweißverfahren für hochgekohten Stahl mit kontrollierter lokaler Wärmebehandlung, dadurch gekennzeichnet, dass der Schritt S2 Folgendes umfasst:

S2.1: Aufheizphase: Der Schweißbereich des hochgekohten Stahls wird auf eine spezifische Temperatur T erhitzt, um die Austenitisierung zu erreichen; die gewählte Temperatur T beträgt 780°C , leicht über dem kritischen Punkt A1 von 727°C . Basierend auf dem Gleichgewichtsphasendiagramm des Materials wird sichergestellt, dass die Karbide bei dieser Temperatur vollständig gelöst werden und eine gleichmäßige Austenitstruktur entsteht. Um die

Aufheizrate R_h zu steuern, wird die Formel $R_h = (T - T_0) / t_h$ verwendet, wobei T_0 die Anfangstemperatur und t_h die benötigte Aufheizzeit ist. R_h wird auf 15°C/min festgelegt, um einen gleichmäßigen Temperaturanstieg zu gewährleisten und thermische Spannungen sowie Strukturungleichmäßigkeiten zu verhindern.

S2.2: Haltephase: Nach Erreichen der Zieltemperatur wird eine konstante Haltebehandlung durchgeführt, die Zeit wird auf 20 Minuten festgelegt. Die Berechnungsformel für die Haltezeit lautet:

$$t_{hb} = C \cdot d,$$

wobei C eine Konstante von 4 Minuten pro Millimeter ist und d die Schweißnahtdicke darstellt. Für eine Schweißnahtdicke von 5 Millimetern beträgt die Haltezeit 20 Minuten. Dies gewährleistet die Gleichmäßigkeit des Austenits und die vollständige Auflösung der Karbide.

S2.3: Langsame Abkühlung: Nach der Haltephase erfolgt eine langsame Abkühlung, um eine Martensitbildung und die daraus resultierende Versprödung des Materials zu vermeiden. Die Abkühlrate R_c wird mithilfe der Formel $R_c = (T - T_f) / t_c$ gesteuert, wobei T_f die Endtemperatur und

t_c die Abkühlzeit ist. R_c wird strikt auf 7°C/min kontrolliert. Durch diese langsame Abkühlrate wird die Bildung von feinem Perlit und Ferrit im Schweißbereich gefördert.

S2.4: Mikrostrukturanalyse und Härteprüfung: Nach Abschluss der Wärmebehandlung wird die Mikrostruktur des Schweißbereichs mithilfe eines Mikroskops analysiert, um das Verhältnis, die Verteilung und die Gleichmäßigkeit von Perlit, Ferrit und Karbiden zu bestätigen. Die Härteprüfung erfolgt mit einem Brinell-Härteprüfgerät.

S2.5: Spannungsabbau: Eine niedrigtemperierte Spannungsabbau-Behandlung wird durchgef

ührt. Die Schweißbaugruppe wird auf $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhitzt und 1 Stunde lang gehalten.

5. Wie in Anspruch 1 beschriebenes hochfrequentes Laserpräzisionsschweißverfahren für hochgekohten Stahl mit kontrollierter lokaler Wärmebehandlung, dadurch gekennzeichnet, dass der Schritt S3 Folgendes umfasst:

S3.1: Einstellung der Laserleistung: Die Laserleistung wird basierend auf den physikalischen Eigenschaften des Materials festgelegt. Sie wird entsprechend der Wärmeleitfähigkeit berechnet.

Die benötigte Laserleistung ergibt sich aus der Formel $P = k \cdot A \cdot (T_m - T_1)$, wobei A die vorgesehene Schmelzbadsfläche, T_m der Schmelzpunkt des Materials ($1535\text{ }^{\circ}\text{C}$) und T_1 die Umgebungstemperatur ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$) ist.

S3.2: Bestimmung der Schweißgeschwindigkeit: Die Schweißgeschwindigkeit V wird mithilfe der Formel $V = E / (P \cdot t)$ berechnet, wobei E die benötigte Energie pro Längeneinheit, P die Laserleistung und t die Materialdicke ist.

S3.3: Anpassung der Fokusposition: Die Fokusposition Z_f des Lasers beeinflusst die Schmelztiefe und -breite. Sie wird präzise durch die Formel $Z_f = f + \Delta f$ eingestellt, wobei f die Brennweite des Lasersystems und Δf die experimentell ermittelte Fokuskorrektur ist.

S3.4: Einstellung des Schutzgasflusses: Der Schutzgasfluss verhindert die Oxidation der Schweißnaht während des Schweißens und gewährleistet eine moderate Abkühlgeschwindigkeit.

Die Schutzgasflussrate F_g wird mithilfe der Formel $F_g = C_g \cdot S$ berechnet, wobei C_g der Gasflusskoeffizient und S die Schweißgeschwindigkeit ist.

S3.5: Kontrolle des Wärmeeintrags: Der Wärmeeintrag Q wird durch die Formel $Q = P / V$ präzise gesteuert, wobei P die Laserleistung und V die Schweißgeschwindigkeit ist. Dies gewährleistet eine gleichmäßige Wärmeverteilung während des Schweißprozesses.

6. Wie in Anspruch 1 beschriebenes hochfrequentes Laserpräzisionsschweißverfahren für hochgekohten Stahl mit kontrollierter lokaler Wärmebehandlung, dadurch gekennzeichnet, dass der Schritt S4 Folgendes umfasst:

S4.1: Datenerfassung und Sensoranordnung: Mithilfe von Temperaturmesssensoren, Kameraüberwachungseinrichtungen und Laserleistungssensoren werden Daten zu Temperatur, Bild und Leistung während des Schweißprozesses an der Schweißstelle und deren Umgebung gesammelt. Die Datenerfassungsfrequenz wird entsprechend der Schweißgeschwindigkeit und den dynamischen Veränderungen des Schmelzbades auf 1000 Abtastungen pro Sekunde eingestellt, um eine hochpräzise Echtzeitüberwachung sicherzustellen.

S4.2: Temperaturüberwachung und Rückkopplungsregelung: Die Temperatur T im Schweißbereich wird mithilfe eines Infrarot-Temperaturmessgeräts überwacht, um sicherzustellen, dass sie im festgelegten Bereich bleibt und Überhitzung oder unzureichende

Erwärmung vermieden wird. Der Temperaturbereich wird auf $T_{\min}$ bis $T_{\max}$ festgelegt, wobei $T_{\min}$ $1530\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $T_{\max}$ $1580\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt.

Wenn $T > T_{\max}$, wird die Laserleistung P reduziert, wobei der Anpassungswert berechnet wird als $\Delta P = k_1 \cdot (T - T_{\max})$, wobei k_1 der Regelkoeffizient ist.

Wenn $T < T_{\min}$, wird die Laserleistung P erhöht, wobei der Anpassungswert berechnet wird

als $\Delta P = k_2 \cdot (T_{\min} - T)$, wobei k_2 der Regelkoeffizient ist.

S4.3: Visuelle Schweißüberwachung: Eine hochauflösende Kamera erfasst in Echtzeit Bilder des Schmelzbades. Anschließend analysiert ein Faltungsneuronales Netzwerk (CNN) die Schweißnahtform. Das CNN klassifiziert und erkennt Anomalien in der Form des Schmelzbades und der Schweißnaht. Nach umfangreichem Training mit annotierten Daten kann das CNN präzise verschiedene Schweißnahtmerkmale identifizieren und Formanomalien wie Nahtversatz oder unzureichende Schmelztiefe erkennen. Falls visuelle Abweichungen festgestellt werden, korrigiert das System diese mithilfe eines Fuzzy-Logik-Reglers in Echtzeit. Der Fuzzy-Regler bewertet die Abweichungen zwischen den CNN-Ausgabedaten und den idealen Schweißnahtdaten und nimmt umfassende Anpassungen der Laserfokusposition und der Schweißgeschwindigkeit vor. Die Fuzzy-Regelbasis wird auf Basis verschiedener Schweißbedingungen erstellt und ermöglicht eine flexible Anpassung an komplexe Veränderungen der Schweißnahtform.

S4.4: Laserleistungsüberwachung und -anpassung: Ein Laserleistungssensor überwacht in Echtzeit die Laserleistung und stellt sicher, dass Schwankungen innerhalb des festgelegten engen Bereichs bleiben. Falls die überwachte Leistungsabweichung ΔP den Feinabstimmungsbereich überschreitet, passt das Steuerungssystem die Laserleistung automatisch mithilfe eines adaptiven Regelungsalgorithmus in Echtzeit an, um die Laserleistung stabil auf dem Zielwert zu halten.

S4.5: Integrierte Rückkopplungsregelung: Die Schweißparameter werden durch das verteilte Steuerungssystem analysiert und sofort angepasst. Wenn die Parameter von den Qualitätsstandards abweichen, wird die Priorität der Korrekturen mithilfe eines Algorithmus bestimmt. Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit werden entsprechend den Formeln $P_{\text{new}} = P_{\text{old}} + \Delta P$ und $S_{\text{new}} =$

$S_{\text{old}} + \Delta S$ aktualisiert. Die Anpassungseffekte werden automatisch aufgezeichnet und die Daten an das Steuerungssystem zurückgemeldet, um nachfolgende Schweißprozesse zu optimieren.

7. Wie in Anspruch 1 beschriebenes hochfrequentes Laserpräzisionsschweißverfahren für hochgekohten Stahl mit kontrollierter lokaler Wärmebehandlung, dadurch gekennzeichnet, dass der Schritt S5 Folgendes umfasst:

S5.1: Vorerwärmbehandlung: Reduzierung des Temperaturgradienten während der Nachwärmebehandlung, um die Entstehung thermischer Spannungen zu verringern; die

Vorerwärmtemperatur T_{pre} wird auf 600°C und die Zeit t_{pre} auf 30 Minuten festgelegt. Ein Temperaturkontrollgerät wird verwendet, um sicherzustellen, dass die Temperatur des gesamten Werkstücks gleichmäßig auf die vorgegebene Temperatur erwärmt wird. Die Temperaturüberwachung erfolgt mit einem K-Thermoelement. Falls die gemessene Temperaturabweichung $\Delta T > \pm 5^\circ\text{C}$ beträgt, wird die Leistung P des Heizgeräts gemäß der Formel $P_{\text{new}} = P_{\text{old}} + k \cdot \Delta T$ angepasst, wobei k der Regelkoeffizient ist, um eine schnelle Rückkehr zur Zieltemperatur sicherzustellen.

S5.2: Hauptwärmebehandlung: Durch geeignete Temperatur- und Zeitparameter wird eine Ausscheidungshärtung und Rekristallisationsbehandlung der Schweißnaht durchgeführt. Die

Zieltemperatur T_{main} wird auf $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die Haltezeit t_{main} auf 1 Stunde festgelegt. Die Temperaturregelung erfolgt mittels PID-Regelalgorithmus zur Aufrechterhaltung einer konstanten Behandlungstemperatur, wobei die PID-Regelparameter wie folgt festgelegt sind: Proportionalband $K_p = 1,5$, Integrationszeit $T_i = 10$ Sekunden, Differenzialzeit $T_d = 1$ Sekunde.

- 5 Während des Aufheizprozesses muss die Temperaturanstiegsrate dT/dt auf unter $10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ kontrolliert werden, um thermische Schocks zu vermeiden.

S5.3: Langsame Abkühlung: Verhinderung der Kornvergrößerung und der erneuten Entstehung unerwünschter innerer Spannungen. Die Abkühlrate wird auf $5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ festgelegt, bis die Temperatur des Werkstücks Raumtemperatur erreicht. Während der Abkühlung wird die Strömungsrate des Kühlmediums mithilfe eines Durchflussregelventils fein angepasst. Die Abkühlrate R wird gemäß der Formel $R_{\text{new}} = R_{\text{old}} \pm m \cdot \Delta T$ geregelt, wobei m der Durchflussregelkoeffizient und ΔT der Unterschied zwischen der aktuellen Temperatur und der Zieltemperatur ist.

15 S5.4: Qualitätsprüfung: Durchführung von Härteprüfungen, Mikrostrukturanalysen und Messungen der Eigenspannung. Die Härtemessung erfolgt mit einem Vickers-Härteprüfgerät, wobei die Härtewerte HV aufgezeichnet werden und den Standards $HV_{\text{min}} \leq HV \leq HV_{\text{max}}$ entsprechen müssen. Die Mikrostruktur wird mithilfe eines metallographischen Mikroskops untersucht, um festzustellen, ob Defekte an Korngrenzen oder eine ungleichmäßige Verteilung von Ausscheidungen vorliegen. Die Messung der Eigenspannung erfolgt mithilfe der Röntgenbeugungsmethode, wobei die Ergebnisse innerhalb des voreingestellten Bereichs von $\pm 50\text{ MPa}$ liegen müssen.