



(11)

EP 2 065 477 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Patenterteilung:
27.01.2016 Patentblatt 2016/04

(51) Int Cl.:
C21D 10/00 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **08019597.7**

(22) Anmeldetag: **10.11.2008**

(54) **Verfahren und Vorrichtung zum Aufbau von Eigenspannungen in einem metallischen Werkstück**

Method and device for building up residual stress in a metal workpiece

Procédé et dispositif destinés au montage de contraintes résiduelles dans une pièce usinée métallique

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE FR GB

(30) Priorität: **22.11.2007 DE 102007056502**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
03.06.2009 Patentblatt 2009/23

(73) Patentinhaber: **Airbus Defence and Space GmbH**
85521 Ottobrunn (DE)

(72) Erfinder:

- **Lang, Roland, Dr.**
85457 Wörth (DE)
- **Reese, Eggert, Dr.**
85667 Oberpfaffenhofen (DE)
- **Steinwandel, Jürgen, Dr.**
88690 Uhlhingen-Mühlhofen (DE)

(56) Entgegenhaltungen:

EP-A- 0 933 438 EP-A- 1 188 842
EP-A- 1 669 466 EP-A- 1 852 515
WO-A1-95/25821 US-A- 5 131 957
US-A- 5 911 891 US-A1- 2004 224 179

- **SMITH P R ET AL: "EFFECT OF POWER DENSITY AND PULSE REPETITION ON LASER SHOCK PEENING OF 6AL-4V" JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE, ASM INTERNATIONAL, MATERIALS PARK, OH, US, Bd. 9, Nr. 1, 1. Februar 2000 (2000-02-01), Seiten 33-37, XP000906621 ISSN: 1059-9495**
- **DING K ET AL: "Simulation of multiple laser shock peening of a 35CD4 steel alloy" JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, NL, Bd. 178, Nr. 1-3, 14. September 2006 (2006-09-14), Seiten 162-169, XP025080710 ISSN: 0924-0136 [gefunden am 2006-09-14]**
- **FOURNIER J ET AL: "MECHANICAL EFFECTS INDUCED BY SHOCK WAVES GENERATED BY HIGH ENERGY LASER PULSES" JOURNAL DE PHYSIQUE III, EDITIONS DE PHYSIQUE, PARIS, FR, Bd. 1, Nr. 9, 1. September 1991 (1991-09-01), Seiten 1467-1480, XP000461098 ISSN: 1155-4320**

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 2 065 477 B1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Aufbau von Eigenspannungen in einem metallischen Werkstück durch sogenanntes Laser Shock Peening (LSP).

[0002] Laser Shock Peening (LSP) ist ein Verfahren, bei dem mittels Einwirkung eines gepulsten Laserstrahls in einem metallischen Werkstück Eigenspannungen aufgebaut werden können. Die Eigenspannungen im metallischen Werkstück sind oftmals erwünscht, da sie Ermüdungserscheinungen oder Rissausbreitung bei Belastung des Werkstücks vorbeugen können.

[0003] Herkömmlicherweise wird dabei das zu behandelnde Material vor dem Laser Shock Peening mit einer ablativen Oberflächenschicht beaufschlagt. Die Oberflächenschicht ist zum Beispiel eine Metallbeschichtung, eine Metallfolie oder ist aus organischen Materialien gebildet. Wenn der gepulste Laserstrahl auf diese Oberflächenschicht einwirkt, verdampft diese und wird in den Plasmazustand (Zustand mit Ionisation) überführt. Gleichzeitig mit dem Aufbringen des Laserpulses wird über dem Behandlungsort eine Deckschicht erzeugt, die beispielsweise durch fließendes Wasser gebildet wird. Diese Deckschicht trägt dazu bei, dass das transiente, durch die Einwirkung des Laserstrahls auf die Oberflächenschicht gebildete Plasma über einen Zeitraum, der in etwa der Pulsdauer entspricht, räumlich fixiert wird. Dieser quasi Gleichgewichtszustand wird jedoch durch den Plasmadruck durchbrochen, so dass die Deckschicht dem Plasmadruck nicht mehr standhalten kann und das Plasma frei expandiert. Dabei werden dynamische Impulse auf die Oberfläche des Werkstücks übertragen, die Stoßwellen hervorrufen, welche ihrerseits zur Induktion von Eigenspannungen im Werkstück führen.

[0004] Der Laserpuls mit einer Energie von beispielsweise 5 bis 50 J dient dabei sowohl der Verdampfung der Oberflächenschicht als auch der Plasmaausbildung. Die verwendeten Laserstrahlen haben herkömmlicherweise eine Pulsbreite von 10 bis 50 Nanosekunden (nsec).

[0005] Nach Bedarf und je nach Werkstückkonfiguration wird ein solcher Laserimpuls räumlich versetzt, gleichzeitig oder zeitlich versetzt an verschiedenen Orten am Werkstück aufgebracht, indem z. B. das Werkstück und die Lasererzeugungseinrichtung zueinander relativ bewegt werden und jeweils identische Laserimpulse auf verschiedene Orte am Werkstück einwirken.

[0006] Somit wirkt an einem Ort stets ein einziger Laserpuls ein, der ausreichend energetisch ist (durch Steuerung der Laserpulsenergie sowie der Pulsbreite), dass er zum Erzeugen und Ausbreiten des Plasmas führt und dass die induzierte Festkörperstoßwelle eine ausreichend hohe Stoßstärke hat, so dass im Werkstück die plastische Fließgrenze überschritten wird und damit die Eigenspannungen im metallischen Werkstück aufgebaut werden. Hauptsächlich wird das Verfahren zum Aufbau von Druckeigenspannungen an Oberflächenbereichen,

das heißt in Tiefen bis zu 10 mm, zum Schutz vor Spannungs-Riss-Korrosion oder aber auch zur Umformung verwendet.

[0007] Davon ausgehend ist es Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zum Aufbau von Eigenspannungen in einem metallischen Werkstück unter Verwendung von Laser Shock Peening (LSP) bereit zu stellen, das die Energie des Laserstrahls besser ausnützt und somit zu gezielteren und stärkeren Stoßwellen im Werkstück, die wiederum die Induktion von Eigenspannungen hervorruft, führt.

[0008] Diese Aufgabe wird mit einem Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Bevorzugte Ausführungsformen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Eine Vorrichtung ist in Anspruch 13 angegeben.

[0009] Der Erfindung liegt der Gedanke zugrunde, an ein und demselben Behandlungsort des Werkstücks mindestens zwei zeitlich gestaffelte Laserpulse, ggf. mit einer kurzen Pause ohne Laserpulsbeaufschlagung zwischen den gestaffelten Laserpulsen, aufzubringen. Dadurch kann die durch den Laserstrahl eingebrachte Energie auf die in der Oberflächenschicht auftretenden physikalischen Vorgänge gezielt eingestellt werden, so dass beispielsweise durch den ersten Puls die Verdampfung bzw. Ablation der absorbierenden Schicht hervorgerufen wird und ein Vorplasma, das schwach ionisiert ist, ausgebildet wird. In diesem Beispiel kann der zweite Laserpuls so energetisch gesteuert sein, dass er die Ausbildung eines voll ausgebildeten, quasi statischen Plasmas, das ein nicht Gleichgewichtszustand mit hoher Ionisation ist, hervorruft und auch zur Expansion des Plasmas durch die Deckschicht und damit zur Induktion der Eigenspannungen im Werkstück führt.

[0010] Dabei sind die zeitlich gestaffelten und auf denselben Behandlungsort einwirkenden Laserpulse durch unterschiedliche Energie gekennzeichnet. Bei Verwendung von zwei gestaffelten Pulsen ist dabei der zweite Puls wesentlich höher energetisch als der erste Puls. Dadurch kann der erste Puls die Verdampfung, für die eine wesentlich geringere Energie benötigt wird als für die daran anschließende Ausbildung und Expansion eines instationären Plasmas mit vergleichsweise hoher Enthalpie, ein niedrig energetischer Laserpuls eingesetzt werden, während die verhältnismäßig hohe Energie des zweiten Laserpulses, die für die spätere Umwandlung der Plasmaenergie in überwiegend energetische Strömungsenthalpie erforderlich ist, sehr gut ausgenutzt und vorwiegend für den Umwandlungs- und

[0011] Expansionsvorgang des instationären Plasmas verwendet wird, ohne dass massive Strahlungsverluste oder starke (unnötige) Temperaturerhöhungen auftreten. Auch bei Verwendung von mehr als zwei Laserpulsen sollte in jedem Fall der Laserpuls, der für die Ausbildung und Expansion des instationären Plasmas bestimmt ist, verhältnismäßig hochenergetisch sein. Damit wird der Verdampfungs- und Plasmaheizungsprozess zeitlich entkoppelt, so dass die energetische Ausnutzung

der Laserimpulse besser und die Einwirkung auf das Werkstück gezielter ist.

[0012] Durch die Doppel- bzw. Mehrfachpulsanregung wird zudem durch einen zunächst verhältnismäßig moderaten Energieeinsatz das schwach ionisierte Primärplasma erzeugt. Dieser primäre Plasmazustand hat jedoch ein hohes Absorptionsvermögen für die Strahlung des sekundären Laserpulses, so dass ein weitaus höherer Anteil der einfallenden Laserstrahlung effektiv in Plasmaenthalpie umgesetzt werden kann, als es bei einer herkömmlichen Einzelpulsanregung möglich ist. Die entstehenden Verluste durch Reflexion, der Durchgang des Laserpulses unausgenutzt zur Metalloberfläche über ein anfänglich optisch dünnes Plasma sowie durch Konvektion und auch Strahlung können somit minimiert werden.

[0013] Die Laserpulse haben einen zeitlichen Abstand von 5 bis 100 nsec.

[0014] Grundsätzlich ist es auch möglich, die Laserpulse unmittelbar aufeinander, das heißt ohne zeitlichen Versatz, folgen zu lassen. Allerdings ist es deutlich bevorzugt, einen Zeitraum von 5 bis 100 nsec zwischen den Laserpulsen vorzusehen, da dann durch entsprechende Abstimmung der Laserpulse, des zeitlichen Abstands und der Anzahl der Laserpulse gezielt auf die einzelnen bei der Ausbildung des Plasmas und im Plasma ablaufenden Vorgänge eingewirkt und jeder Laserpuls auf einem bestimmten Zustand des Plasmas abgestimmt werden kann.

[0015] Vorzugsweise sind die Pulsformen der zeitlich gestaffelten Laserpulse ebenfalls unterschiedlich. Insbesondere ist es bevorzugt, dass die Laserpulse unterschiedliche Anstiegsflankenformen haben. Damit kann neben der Steuerung der Energie der Laserpulse mittels ihrer Breite (zeitlich) und Energie, die jeweils unterschiedlich oder gleich sein können, auch durch Wahl einer geeigneten Anstiegsflanke gezielt auf die energetischen Prozesse eingewirkt werden.

[0016] Vorzugsweise werden die unterschiedlichen energetischen Zustände der gestaffelt einwirkenden Laserpulse durch deren zeitliche Breite und/oder Energie erzeugt.

[0017] Nach einer bevorzugten Ausführungsform werden mehr als zwei zeitlich gestaffelte Laserpulse auf denselben Behandlungsort aufgebracht und wirken dort ein. In diesem Fall ist die energetische Steuerung noch günstiger.

[0018] Wie beim herkömmlichen Einzelpulsverfahren kann auch bei Doppel- bzw. Mehrfachpulsverfahren gemäß der Erfindung umspülendes fließendes Wasser als Deckschicht verwendet werden. Dies ist eine verhältnismäßig kostengünstig zu erzeugende und einfach zu entsorgende Deckschicht.

[0019] Die zeitlich gestaffelten Laserpulse können durch einen einzigen Laser oder aber durch für jeden Laserpuls unterschiedlichen Laser vorgesehen werden. Gerade bei der bevorzugten Verwendung von mehreren Bearbeitungslasern zur Erzeugung der gestaffelten Laserpulse ist es einfach möglich, unterschiedliche Puls-

formen, unterschiedliche Energien der Pulse usw. darzustellen. Auch bei Verwendung mehrerer Bearbeitungslaser wirken diese jedoch zeitlich gestaffelt auf den gleichen Bearbeitungsort am Werkstück ein.

[0020] Das Verfahren, das vorzugsweise weiter den Schritt des Aufbringens der zu verdampfenden Oberflächenschicht vor dem Aufbringen des ersten Laserpulses enthält, die beispielsweise durch Metallbeschichtung, Aufbringen einer Metallfolie oder Aufbringen von organischem Material erzeugt wird, kann nach Bedarf und je nach Werkstück, in das die Eigenspannungen einzubringen sind bzw. an dem die Umformung zu erzeugen ist, an mehreren Orten des Werkstücks wiederholt werden, um z. B. eine großflächigere Verfestigung zu erzielen, wobei jedoch dann an jedem Ort ein Doppel- oder Mehrfachpuls einwirkt.

[0021] Ein weiterer Aspekt der vorliegenden Erfindung betrifft eine Vorrichtung enthaltend eine Werkstückspaneinrichtung, mindestens einen Laser und eine Steuereinrichtung zum Steuern der Relativbewegung zwischen eingespanntem Werkstück und Laser, wobei die Steuereinrichtung angepasst ist, ein Verfahren zum Aufbau von Eigenspannungen in einem metallischen Werkstück durch Laser-Shock-Peening zu steuern, dass Verfahren enthaltend die Schritte:

- Aufbringen eines ersten Laserpulses an einem Behandlungsort des mit einer Oberflächenschicht bedeckten Werkstücks, welcher zur Verdampfung oder Ablation der Oberflächenschicht ein schwach ionisiertes Vorplasma erzeugt mit einem hohen Absorptionsvermögen für die Strahlung eines zweiten Laserpulses;
- Aufbringen eines zweiten Laserpulses an demselben Behandlungsort des Werkstücks, welcher ein voll ausgebildetes quasi statisches Plasma ausbildet; wobei der zweite Laserpuls zeitlich zu dem ersten Laserpuls gestaffelt ist mit einem Zeitraum von 5 bis 100 nsec zwischen den Laserpulsen;
- wobei der zweite Laserpuls wesentlich höher energetisch ausbildet ist als der erste Laserpuls; und
- Vorsehen einer Deckschicht über dem Behandlungsort während des Aufbringens der Laserpulse.

[0022] Nachfolgend wird die Wirkweise des Verfahrens beschrieben.

[0023] Beim Laser Shock Peening ist es erforderlich, eine möglichst hohe primäre Plasmaenthalpie zu erreichen, für einen Zeitraum, in dem das Plasma durch die Deckschicht, beispielsweise fließendes Wasser, weitgehend stabilisiert wird. Wird ein einziger Laserpuls zur Verdampfung des Ablationsmaterials und zum Erzeugen eines transienten Hochdruckplasmas (mit Spitzendrücken, die bis zu über 10 bar reichen) verwendet, so ist dies energetisch nicht optimal, da für die Verdampfung und primäre Plasmaerzeugung eine geringere Energie benötigt wird als für die darauf folgende Ausbildung eines instationären Plasmas mit vergleichsweise hoher Enthal-

pie.

[0024] In der primären Plasmaphase erfolgt nämlich bereits eine gewisse Impulsübertragung auf das Werkstück über einen instationären Druckgradienten. Dies kann bereits primäre Verdichtungsstöße induzieren. Allerdings ist dieser Prozess kaum steuerbar und nicht besonders effektiv und somit nicht geeignet, signifikante und gezielte Druckeigenspannungen auszubilden. Die eigentliche Phase der Induktion von Druckeigenspannungen beginnt mit der Expansion des Plasmas (dem strömenden Plasma) nach der quasi statischen Anfangsphase, in der die Deckschicht die Expansion begrenzt. Beim Durchbrechen der Deckschicht wird eine Überschallplasmaströmung erzeugt, deren rückwirkender dynamischer Impuls die Stoßwelle auslöst, die das Werkstück, insbesondere dessen metallisches Material, über die plastische Fließgrenze hinaus deformiert und somit auch nach Abfall des Plasmas und Relaxion Druckeigenspannungen hinterlässt.

[0025] Es hat sich gezeigt, dass dieser Prozess umso effektiver ist, je höher die ursprüngliche Enthalpie (definiert über Druck und Temperatur) des primären Plasmas ist, und wie diese in kinetische Strömungsenthalpie überführt werden kann, was in der Phase des expandierenden und schnell strömenden, die Deckschicht durchbrechenden Plasmas geschieht.

[0026] Somit lassen sich die ablaufenden Einzelprozesse beim Laser Shock Peening wie folgt einteilen:

- Primäre Verdampfung (Ablation) der absorbierenden Schicht;
- Ausbildung eines Vorplasmas, das schwach ionisiert ist;
- Ausbildung eines voll ausgebildeten, quasi statischen Plasmas, das ein Nichtgleichgewichtszustand mit hoher Ionisation ist; und
- Expansion des Plasmas durch die Deckschicht.

[0027] Durch das Aufbringen von mindestens zwei zeitlich gestaffelten Pulsen auf den gleichen Werkstückort kann vermieden werden, dass Laserenergie in den Plasmazustand in der Expansionsphase übertragen wird. Dies ist nämlich ineffektiv, da die Prozesse unterschiedliche zeitliche Entwicklungsstufen besitzen und die in der Expansionsphase in den Plasmazustand eingebrachte Energie nicht in kinetische Energie (zur Ausbildung des voll ausgebildeten quasi statischen Plasmas) sondern beispielsweise in Temperatur oder Strahlungsenergie umgesetzt wird und somit einen Energieverlust darstellt.

[0028] Daher bietet es sich an, einen Abstand von 5 bis 100 nsec zwischen den einzelnen Laserpulsen vorzusehen, so dass die zeitliche Überführung des sich ausbildenden Plasmas in die einzelnen Stufen ohne Energie zu Zeitpunkten einzubringen, zu denen sie nicht umgesetzt werden kann, möglich ist, und zudem die Energien der Laserpulse angepasst an den gerade ablaufenden Teilprozess festgesetzt werden können.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Aufbau von Eigenspannungen in einem metallischen Werkstück durch Laser-Shock-Peening, enthaltend die Schritte:

- Aufbringen eines ersten Laserpulses an einem Behandlungsort des mit einer Oberflächenschicht bedeckten Werkstücks, welcher zur Verdampfung oder Ablation der Oberflächenschicht ein schwach ionisiertes Vorplasma erzeugt mit einem hohen Absorptionsvermögen für die Strahlung eines zweiten Laserpulses;
- Aufbringen eines zweiten Laserpulses an demselben Behandlungsort des Werkstücks, welcher ein voll ausgebildetes quasi statisches Plasma ausbildet;
- wobei der zweite Laserpuls zeitlich zu dem ersten Laserpuls gestaffelt ist mit einem Zeitraum von 5 bis 100 nsec zwischen den Laserpulsen;
- wobei der zweite Laserpuls wesentlich höher energetisch ausbildet als der erste Laserpuls; und
- Vorsehen einer Deckschicht über dem Behandlungsort während des Aufbringens der Laserpulse.

2. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Laserpulse unterschiedliche Pulsformen aufweisen.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die zeitlich gestaffelten Laserpulse unterschiedliche Anstiegsflankenformen aufweisen.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die zeitlich gestaffelten Laserpulse unterschiedliche zeitliche Breite haben.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** mehr als zwei zeitlich gestaffelte Laserpulse auf den Behandlungsort eingebracht werden.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Deckschicht durch Umspülen des Werkstücks vorgesehen wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** zum Umspülen des Werkstücks fließendes Wasser verwendet wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche

che, **dadurch**

gekennzeichnet, dass ein einziger Laser vorgesehen wird, aus dem die Laserpulse abgegeben werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** zum Erzeugen jedes der zeitlich gestaffelten Laserpulse ein separater Laser vorgesehen wird.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiter enthaltend den Schritt des Aufbringens der Oberflächenschicht vor dem Aufbringen des ersten Laserpulses durch Metallbeschichtung, Aufbringen einer Metallfolie oder von einem organischen Material.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Energie des ersten Laserpulses so angepasst ist, dass er zur Verdampfung der absorbierenden Oberflächenschicht und zum Ausbilden eines schwach ionisierten Vorplasmas führt.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verfahren an verschiedenen Behandlungsorten des Werkstücks wiederholt wird.
13. Vorrichtung enthaltend eine Werkstückspanneinrichtung, mindestens einen Laser und eine Steuereinrichtung zum Steuern der Relativbewegung zwischen eingespanntem Werkstück und Laser, wobei die Steuereinrichtung angepasst ist, das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche zu steuern.

Claims

1. Method for building up residual stresses in a metal workpiece by means of laser shock peening, comprising the steps of:
 - applying a first laser pulse to a treatment location of the workpiece covered with a surface coating which, for the purpose of vaporizing or ablating the surface coating, generates a weakly ionized pre-plasma with high absorptivity for the radiation of a second laser pulse;
 - applying a second laser pulse to the same treatment location of the workpiece, which forms a fully formed, quasi-static plasma;
 - wherein the second laser pulse is temporally staggered with respect to the first laser pulse, with a time interval of 5 to 100 ns between the

laser pulses;

- wherein the second laser pulse is of substantially higher energy than the first laser pulse; and
 - providing a cover layer over the treatment location during application of the laser pulses.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

2. Method according to the preceding claim, **characterized in that** the laser pulses have different pulse forms.
3. Method according to Claim 2, **characterized in that** the temporally staggered laser pulses have different leading edge forms.
4. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** the temporally staggered laser pulses have different temporal widths.
5. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** more than two temporally staggered laser pulses are applied to the treatment location.
6. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** the cover layer is provided by rinsing the workpiece.
7. Method according to Claim 6, **characterized in that** flowing water is used for rinsing the workpiece.
8. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** there is provided a single laser which emits the laser pulses.
9. Method according to one of Claims 1 to 7, **characterized in that** a separate laser is provided for generating each of the temporally staggered laser pulses.
10. Method according to one of the preceding claims, further comprising the step of applying the surface coating, prior to application of the first laser pulse, by means of metal coating, applying a metal foil or applying an organic material.
11. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** the energy of the first laser pulse is adapted such that it vaporizes the absorbent surface coating and forms a weakly ionized pre-plasma.
12. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** the method is repeated at various treatment locations on the workpiece.
13. Apparatus containing a workpiece clamping device, at least one laser and a control device for controlling the relative movement between a clamped work-

piece and the laser, wherein the control device is designed to control the method according to one of the preceding claims.

Revendications

1. Procédé pour instaurer des contraintes résiduelles dans une pièce métallique par grenailage au choc laser, comportant les étapes suivantes:

- application d'une première impulsion laser à un site de traitement de la pièce revêtue d'une couche de surface, qui produit, pour la vaporisation ou l'ablation de la couche de surface, un pré-plasma faiblement ionisé avec un pouvoir d'absorption élevé pour le rayonnement d'une deuxième impulsion laser;
- application d'une deuxième impulsion laser au même site de traitement de la pièce, qui génère un plasma quasi statique pleinement formé;
- dans lequel la deuxième impulsion laser est échelonnée dans le temps par rapport à la première impulsion laser d'un intervalle de 5 à 100 ns entre les impulsions laser;
- dans lequel la deuxième impulsion laser est nettement plus énergétique que la première impulsion laser; et
- prévision d'une couche de recouvrement sur le site de traitement pendant l'application des impulsions laser.

2. Procédé selon la revendication précédente, **caractérisé en ce que** les impulsions laser présentent des formes d'impulsion différentes.

3. Procédé selon la revendication 2, **caractérisé en ce que** les impulsions laser échelonnées dans le temps présentent des formes de flanc montant différentes.

4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** les impulsions laser échelonnées dans le temps ont une largeur temporelle différente.

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'on applique plus de deux impulsions laser échelonnées dans le temps au site de traitement.

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'on prévoit la couche de recouvrement par balayage de la pièce.

7. Procédé selon la revendication 6, **caractérisé en ce que** l'on utilise de l'eau courante pour le balayage de la pièce.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'il** est prévu un seul laser, par lequel les impulsions laser sont émises.

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce qu'il** est prévu un laser séparé pour la production de chacune des impulsions laser échelonnées dans le temps.

10. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, comportant en outre l'étape d'application de la couche de surface avant l'application de la première impulsion laser par revêtement métallique, application d'un film métallique ou d'un matériau organique.

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'énergie de la première impulsion laser est adaptée de telle manière qu'elle conduise à la vaporisation de la couche de surface absorbante et à la formation d'un pré-plasma faiblement ionisé.

12. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** le procédé est répété en différents sites de traitement différents de la pièce.

13. Dispositif comprenant un dispositif de serrage de pièce, au moins un laser et un dispositif de commande pour commander le mouvement relatif entre une pièce serrée et le laser, dans lequel le dispositif de commande est adapté pour commander le procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes.