



(10) **DE 10 2015 109 072 A1** 2015.12.10

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2015 109 072.4**

(22) Anmeldetag: **09.06.2015**

(43) Offenlegungstag: **10.12.2015**

(51) Int Cl.: **B23K 11/20** (2006.01)

**B23K 11/10** (2006.01)

(30) Unionspriorität:

**62/010,192**      **10.06.2014**    **US**  
**14/729,693**      **03.06.2015**    **US**

(74) Vertreter:

**Manitz, Finsterwald & Partner GbR, 80336  
München, DE**

(71) Anmelder:

**GM Global Technology Operations LLC (n. d. Ges.  
d. Staates Delaware), Detroit, Mich., US**

(72) Erfinder:

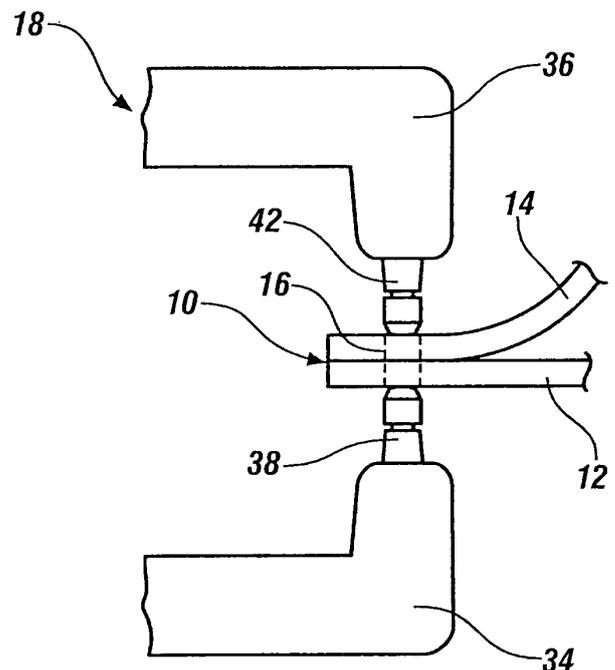
**Yang, David, Shanghai, CN; Sigler, David R.,  
Shelby Township, Mich., US; Wang, Hui-Ping,  
Troy, Mich., US**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **EINDRINGMERKMAL IN EINEM ALUMINIUMLEGIERUNGS-WERKSTÜCK ZUM VERBESSERN  
DES AL-STAHL-PUNKTSCHWEISSENS**

(57) Zusammenfassung: Verfahren zum Punktschweißen eines Werkstückstapels, der ein Stahlwerkstück und ein benachbartes Aluminiumlegierungs-Werkstück umfasst, beinhaltet, dass ein elektrischer Strom durch den Werkstückstapel und zwischen flächig ausgerichtete Schweißelektroden in Kontakt mit entgegengesetzten Seiten des Stapels geleitet wird. Die Ausbildung einer Schweißverbindung zwischen den benachbarten Stahl- und Aluminiumlegierungs-Werkstücken wird durch ein in einem Aluminiumlegierungs-Werkstück angeordnetes Eindringmerkmal unterstützt, welches eine Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt, und gegen das an der Schweißstelle eine Schweißelektrode über dem Eindringmerkmal gepresst wird. Das Eindringmerkmal beeinflusst das Flussmuster und die Dichte des elektrischen Stromes, der durch die überlappenden Werkstücke fließt, und man nimmt auch an, dass er dabei hilft, die Auswirkungen jeglicher feuerfesten/r Oberflächenoxidschichten zu minimieren, welche auf dem Aluminiumlegierungs-Werkstück vorhanden sein kann/können, das benachbart zu dem Stahlwerkstück liegt.



**Beschreibung**QUERVERWEIS AUF  
VERWANDTE ANMELDUNGEN

**[0001]** Diese Anmeldung beansprucht die Priorität der vorläufigen U.S.-Anmeldung Nr. 62/010 192, eingereicht am 10. Juni 2014, deren gesamter Inhalt hiermit durch Bezugnahme aufgenommen ist.

## TECHNISCHES GEBIET

**[0002]** Das technische Gebiet der Offenbarung betrifft allgemein das Widerstandspunktschweißen und im Spezielleren das Widerstandspunktschweißen eines Stahlwerkstückes und eines Aluminiumlegierungs-Werkstückes.

## HINTERGRUND

**[0003]** Das Widerstandspunktschweißen ist ein Prozess, der in einer Anzahl von Industrien verwendet wird, um zwei oder mehr Metallwerkstücke zusammenzufügen. Beispielsweise verwendet die Automobilindustrie das Widerstandspunktschweißen oft, um vorgefertigte Metallwerkstücke während der Fertigung u. a. einer/s Fahrzeugsür-, -haube-, -Kofferraumdeckels, oder -Heckklappe zusammenzufügen. In der Regel wird eine Anzahl von Punktschweißnähten entlang einer umlaufenden Kante der Metallwerkstücke oder einer anderen Bindungsregion gebildet, um sicherzustellen, dass das Teil strukturell einwandfrei ist. Während das Punktschweißen in der Regel praktiziert wurde, um bestimmte, ähnlich zusammengesetzte Metallwerkstücke – z. B. Stahl an Stahl und Aluminiumlegierung an Aluminiumlegierung – zusammenzufügen, hat der Wunsch, leichtere Materialien in eine Fahrzeugkarosseriestruktur einzubauen, zu einem Interesse daran geführt, Stahlwerkstücke mittels Widerstandspunktschweißen an Aluminiumlegierungs-Werkstücke zu fügen. Der zuvor erwähnte Wunsch des Widerstandspunktschweißens von artungleichen Metallwerkstücken ist nicht nur der Automobilindustrie eigen; tatsächlich ist er in viele Industrien vorhanden, die das Punktschweißen als ein Fügeverfahren nutzen können, umfassend u. a. die Luftfahrt, die Schifffahrt, die Eisenbahn und die Bauindustrie.

**[0004]** Das Widerstandspunktschweißen beruht allgemein auf dem Widerstand gegen den Fluss eines elektrischen Stromes durch überlappende Metallwerkstücke und über deren Stoßgrenzfläche(n) hinweg, um Wärme zu erzeugen. Um solch einen Schweißprozess auszuführen, wird ein Satz aus zwei entgegengesetzten Punktschweißelektroden an ausgerichteten Punkten auf gegenüberliegende Seiten des Werkstückstapels geklemmt, der in der Regel zwei oder drei Metallwerkstücke umfasst, die in einer überlappenden Konfiguration an einer vorbe-

stimmten Schweißstelle angeordnet sind. Dann wird ein elektrischer Strom von einer Schweißelektrode zu der anderen durch die Metallwerkstücke hindurch geleitet. Der Widerstand gegen den Fluss dieses elektrischen Stromes erzeugt Wärme innerhalb der Metallwerkstücke und an deren Stoßgrenzfläche(n). Wenn der Werkstückstapel ein Stahlwerkstück und ein benachbartes Aluminiumlegierungs-Werkstück umfasst, initiiert und bringt die an der Stoßgrenzfläche und innerhalb des Hauptmaterials dieser artungleichen Metallwerkstücke erzeugte Wärme ein Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung zum Wachsen, das sich von der Stoßgrenzfläche weg in das Aluminiumlegierungs-Werkstück hinein erstreckt. Dieses Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung benetzt die benachbarte Stoßfläche des Stahlwerkstückes und erstarrt nach Aufhören des Stromflusses zu einer Schweißlinse, welche eine ganze Schweißverbindung oder einen Teil davon bildet, welche die beiden Werkstücke aneinander bindet.

**[0005]** In der Praxis stellt das Punktschweißen eines Stahlwerkstückes an ein Aluminiumlegierungs-Werkstück allerdings eine Herausforderung dar, da eine Anzahl von Eigenschaften dieser beiden Metalle die Festigkeit – vor allem die Abschälfestigkeit – der Schweißverbindung nachteilig beeinflussen kann. Zum einen enthält das Aluminiumlegierungs-Werkstück üblicherweise eine oder mehrere mechanisch zähe, elektrisch isolierende und selbstregenerierende, feuerfeste Oxidschichten auf seiner Oberfläche. Die Oxidschicht(en) besteht/en in der Regel aus Aluminiumoxiden, können aber auch andere Metalloxidverbindungen einschließlich Magnesiumoxide umfassen, wenn das Aluminiumlegierungs-Werkstück aus einer magnesiumhaltigen Aluminiumlegierung besteht. Infolge ihrer physikalischen Eigenschaften neigt/en die feuerfeste/n Oxidschicht(en) dazu, an der Stoßgrenzfläche intakt zu bleiben, wo sie die Fähigkeit des Schmelzbades aus geschmolzener Aluminiumlegierung, das Stahlwerkstück zu benetzen, behindern kann/können, und auch eine Quelle für Fehlstellen nahe der Grenzfläche innerhalb des wachsenden Schmelzbades bereitstellt/en. Die isolierende Beschaffenheit der Oberflächenoxidschicht(en) erhöht auch den elektrischen Kontaktwiderstand des Aluminiumlegierungs-Werkstückes – und zwar an seiner Stoßfläche und an seinem Elektrodenkontaktpunkt – was es schwierig macht, die Wärme innerhalb des Aluminiumlegierungs-Werkstückes effektiv zu steuern und zu konzentrieren. Man hat sich in der Vergangenheit bemüht, die Oxidschicht(en) vor dem Punktschweißen von dem Aluminiumlegierungs-Werkstück zu entfernen. Derartige Entferungsverfahren können jedoch unpraktisch sein, da die Oxidschicht(en) die Fähigkeit besitzt/en, sich in Gegenwart von Sauerstoff zu regenerieren, insbesondere mit der Anwendung von Wärme von Punktschweißvorgängen.

**[0006]** Das Stahlwerkstück und das Aluminiumlegierungs-Werkstück besitzen auch unterschiedliche Eigenschaften, die dazu neigen, den Punktschweißprozess kompliziert zu machen. Insbesondere weist Stahl einen relativ hohen Schmelzpunkt ( $-1500^{\circ}\text{C}$ ) und einen relativ hohen elektrischen und thermischen Widerstand auf, wohingegen das Aluminiumlegierungsmaterial einen relativ niedrigen Schmelzpunkt ( $-600^{\circ}\text{C}$ ) und einen relativ niedrigen elektrischen und thermischen Widerstand aufweist. Infolge dieser physikalischen Unterschiede wird während eines Stromflusses der Großteil der Wärme in dem Stahlwerkstück erzeugt. Dieses Wärmeungleichgewicht bildet einen Temperaturgradienten zwischen dem Stahlwerkstück (höhere Temperatur) und dem Aluminiumlegierungs-Werkstück (niedrigere Temperatur), der ein schnelles Schmelzen des Aluminiumlegierungs-Werkstückes initiiert. Die Kombination aus dem während des Stromflusses erzeugten Temperaturgradienten und der hohen thermischen Leitfähigkeit des Aluminiumlegierungs-Werkstückes bedeutet, dass unmittelbar nachdem der elektrische Strom aufhört, eine Situation auftritt, in der Wärme nicht symmetrisch von der Schweißstelle verteilt wird. Vielmehr wird Wärme von dem heißeren Stahlwerkstück durch das Aluminiumlegierungs-Werkstück hindurch in Richtung der Schweißelektrode auf der anderen Seite des Aluminiumlegierungs-Werkstückes geleitet, was einen steilen Temperaturgradienten zwischen dem Stahlwerkstück und dieser bestimmten Schweißelektrode erzeugt.

**[0007]** Man nimmt an, dass die Entwicklung eines steilen Temperaturgradienten zwischen dem Stahlwerkstück und der Schweißelektrode auf der anderen Seite des Aluminiumlegierungs-Werkstückes die Integrität der resultierenden Schweißverbindung auf zwei primäre Arten schwächt. Erstens, da das Stahlwerkstück Wärme für eine längere Dauer zurückhält als das Aluminiumlegierungs-Werkstück, nachdem der Fluss des elektrischen Stromes aufgehört hat, erstarrt das Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung gerichtet, beginnend mit der Region, die der kälteren Schweißelektrode (oft wassergekühlt) am nächsten liegt, in Verbindung mit dem Aluminiumlegierungs-Werkstück, und sich in Richtung der Stoßgrenzfläche ausbreitend. Eine Erstarrungsfront dieser Art neigt dazu, Fehlstellen – z. B. Gasporosität, Schrumpfungshohlräume, Mikrorissbildung und Oberflächenoxidrückstände – in Richtung und entlang der Stoßgrenzfläche innerhalb der Schweißlinse mitzureißen oder treiben. Zweitens begünstigt die anhaltend hohe Temperatur in dem Stahlwerkstück das Wachstum von spröden, intermetallischen Fe-Al-Verbindungen an und entlang der Stoßgrenzfläche. Die intermetallischen Verbindungen neigen dazu, dünne Reaktionsschichten zwischen der Schweißlinse und dem Stahlwerkstück zu bilden. Diese intermetallischen Schichten werden, wenn sie vorhanden sind, allgemein als Teil der Schweißverbindung zu-

sätzlich zu der Schweißlinse betrachtet. Das Vorhandensein einer Verteilung von Schweißlinsestellen zusammen mit dem übermäßigen Wachstum von intermetallischen Fe-Al-Verbindungen entlang der Stoßgrenzfläche neigt dazu, die Abschälbarkeit der endgültigen Schweißverbindung herabzusetzen.

**[0008]** Im Licht der zuvor erwähnten Herausforderungen haben bisherige Bemühungen, ein Stahlwerkstück und ein Werkstück auf Aluminiumbasis punktzuschweißen, einen Schweißplan verwendet, der höhere Ströme, längere Schweißzeiten oder beides (verglichen mit dem Punktschweißen von Stahl an Stahl) vorschreibt, um eine vernünftige Schweißverbindungsfläche zu versuchen und zu erhalten. Diese Bemühungen waren großteils erfolglos in einer Fertigungsumgebung und haben die Tendenz, die Schweißelektroden zu beschädigen. Da die bisherigen Punktschweißbemühungen nicht besonders erfolgreich waren, wurden stattdessen vorwiegend mechanische Verbindungselemente wie z. B. Schlagniete und Flow-Drill-Schrauben verwendet. Es dauert jedoch länger, solche mechanischen Verbindungselemente an Ort und Stelle zu setzen, und sie bringen verglichen mit dem Punktschweißen hohe Verbrauchsmaterialkosten mit sich. Sie fügen der Fahrzeugkarosseriestruktur auch Gewicht hinzu – Gewicht, das vermieden wird, wenn das Fügen mittels Punktschweißen bewerkstelligt wird – das einige der durch die Verwendung von Aluminiumlegierungs-Werkstücken erreichten Gewichtseinsparungen von vornherein aufhebt. Fortschritte beim Punktschweißen, die den Prozess besser in die Lage versetzen würden, Stahl- und Aluminiumlegierungs-Werkstücke zu fügen, wären daher eine willkommene Ergänzung auf dem technischen Gebiet.

#### ZUSAMMENFASSUNG DER OFFENBARUNG

**[0009]** Es ist ein Verfahren zum Widerstandspunktschweißen eines Werkstückstapels offenbart, der zumindest ein Stahlwerkstück und ein überlappendes benachbartes Aluminiumlegierungs-Werkstück umfasst. Der Werkstückstapel kann auch ein zusätzliches Werkstück wie z. B. ein weiteres Stahlwerkstück oder ein weiteres Aluminiumlegierungs-Werkstück umfassen, solange das Aluminiumlegierungs-Werkstück eine Seite des Werkstückstapels bereitstellt und das Stahlwerkstück die andere Seite des Stapels bereitstellt. Der Werkstückstapel kann als solcher nur ein Stahlwerkstück und ein überlappendes Aluminiumlegierungs-Werkstück umfassen, oder er kann zwei aneinandergrenzende Stahlwerkstücke, die benachbart zu einem Aluminiumlegierungs-Werkstück angeordnet sind, oder zwei aneinandergrenzende Aluminiumlegierungs-Werkstücke umfassen, die benachbart zu einem Stahlwerkstück angeordnet sind. Außerdem können, wenn der Werkstückstapel drei Werkstücke umfasst, die zwei Werkstücke mit ei-

ner gleichartigen Zusammensetzung durch separate und eigene Teile vorgesehen sein, oder sie können alternativ durch das gleiche Teil vorgesehen sein.

**[0010]** Das offenbarte Verfahren umfasst, dass gegenüberstehende Seiten des Werkstückstapels mit entgegengesetzten und flächig ausgerichteten Schweißelektroden an einer Schweißstelle in Kontakt gebracht werden. Ein elektrischer Strom mit einer hinreichenden Stärke und Dauer (konstant oder gepulst) wird zwischen die Schweißelektroden und durch den Werkstückstapel hindurch geleitet. Der Durchgang des elektrischen Stromes erzeugt ein Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung innerhalb des Aluminiumlegierungs-Werkstückes, das benachbart zu dem Stahlwerkstück liegt. Dieses Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung benetzt eine benachbarte Stoßfläche des Stahlwerkstückes und erstreckt sich von der Stoßgrenzfläche der benachbarten Aluminiumlegierungs-Werkstücke weg in das Aluminiumlegierungs-Werkstück hinein und möglicherweise durch dasselbe hindurch. Während der Zeit, in der das Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung vorhanden ist, kerben und drücken die Schweißelektroden in ihre jeweiligen Werkstückoberflächen ein, um Kontaktflächen zu bilden. Schließlich, nachdem der elektrische Strom aufgehört hat, kühlt das Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung ab und erstarrt zu einer Schweißverbindung, welche die benachbarten Stahl- und Aluminiumlegierungs-Werkstücke an ihrer Stoßgrenzfläche aneinander bindet.

**[0011]** Das Punktschweißverfahren wird durch die Aufnahme eines Eindringmerkmals innerhalb des Aluminiumlegierungs-Werkstückes unterstützt, das durch eine Schweißelektrode auf dieser speziellen Seite des Werkstückstapels kontaktiert wird. Im Speziellen wird während des Punktschweißens eine Schweißelektrode über dem Eindringmerkmal gegen eine Oberfläche des Aluminiumlegierungs-Werkstückes gepresst und es Strom zwischen dieser Elektrode und der anderen Elektrode auf der entgegengesetzten Seite des Stapels ausgetauscht, um die Schweißverbindung zu bilden. Das Eindringmerkmal kann ein Loch sein, das sich vollständig durch das Aluminiumlegierungs-Werkstück hindurch erstreckt, oder es kann alternativ eine Vertiefung sein, welche nur teilweise die Dicke des Aluminiumlegierungs-Werkstückes quert. Und es können mehr als ein Eindringmerkmal in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück enthalten sein, um die Ausbildung von Punktschweißnähten zwischen den zwei Werkstücken an vielen verschiedenen Schweißstellen zu erleichtern. Wie bei dem Aluminiumlegierungs-Werkstück, welches das Eindringmerkmal umfasst und durch die Schweißelektrode kontaktiert wird, kann es das Aluminiumlegierungs-Werkstück sein, das benachbart zu dem/den Stahlwerkstück/en liegt, wie es bei einem Stapel aus zwei Werkstücken oder einem Sta-

pel aus drei Werkstücken, der zwei aneinandergrenzende Stahlwerkstücke umfasst, der Fall ist, oder es kann das Aluminiumlegierungs-Werkstück sein, das über dem Aluminiumlegierungs-Werkstück liegt, welches angrenzend an das Stahlwerkstück liegt, wie es bei einem Stapel aus drei Werkstücken, der ein Stahlwerkstück und zwei benachbarte Aluminiumlegierungs-Werkstücke umfasst, der Fall ist.

**[0012]** Man nimmt an, dass das Pressen der Schweißelektrode über dem Eindringmerkmal und das Austauschen von Strom durch diesen Abschnitt des Aluminiumlegierungs-Werkstückes hindurch die Festigkeit der Schweißverbindung aus zumindest mehreren Gründen positiv beeinflusst. Erstens bewirkt das Eindringmerkmal, dass der zwischen den Schweißelektroden ausgetauschte elektrische Strom beim Einsetzen des Stromflusses und in einigen Fällen über die gesamte Dauer des Stromflusses ein konisches Flussmuster um das Eindringmerkmal herum innerhalb des/der Aluminiumlegierungs-Werkstück/e annimmt. Das konische Flussmuster des elektrischen Stromes hat eine Abnahme der Stromdichte innerhalb zumindest des Aluminiumlegierungs-Werkstückes, das neben dem Stahlwerkstück liegt – verglichen mit dem Stahlwerkstück – zur Folge, wodurch dreidimensionale Temperaturgradienten um das Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung herum gebildet werden, um dabei zu helfen, dass das Schmelzbad auf wünschenswertere Art und Weise zu der Schweißverbindung erstarrt. Zweitens wird die plastische Verformung des Abschnitts des Aluminiumlegierungs-Werkstückes, welcher das Eindringmerkmal umgibt, verstärkt, da erweichte oder geschmolzene Aluminiumlegierung beginnt, die Eindringstelle zu füllen. Diese Wirkung zerbricht die feuerfeste/n Oxidschichte/n, welche die Stoßfläche des Aluminiumlegierungs-Werkstückes bedeckt/en, das benachbart zu dem Stahlwerkstück liegt, um so zuzulassen, dass das Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung dieses benachbarte Stahlwerkstück besser benetzt und den Oxidrest aufräumt, der eine Quelle für Fehlstellen nahe der Grenzfläche innerhalb des wachsenden Schmelzbades bereitstellt. Diese Wirkung an der Stoßgrenzfläche zwischen den benachbarten Stahl- und Aluminiumlegierungs-Werkstücken ist insbesondere effektiv, wenn das Aluminiumlegierungs-Werkstück, welches das Eindringmerkmal umfasst, auch das Aluminiumlegierungs-Werkstück ist, das benachbart zu dem Stahlwerkstück liegt.

**[0013]** Wenn außerdem das Eindringmerkmal in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück vorhanden ist, das benachbart zu dem Stahlwerkstück liegt, und an dem Stahlwerkstück offen ist, stellt das Eindringmerkmal ein/en offenen/s Raum oder Volumen bereit, welcher/s eine Bewegung des Schmelzbades aus geschmolzener Aluminiumlegierung während eines Stromflusses zulässt, die dabei hilft, durch Oxid-

reste in der Nähe der Stoßgrenzfläche verursachte Fehlstellen aufzubrechen und umzuverteilen, um so die mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung zu verbessern. Dieser Schmelzbadbewegungs- oder -rühreffekt tritt auch auf, wenn das Eindringmerkmal in einem zusätzlichen Aluminiumlegierungs-Werkstück vorhanden ist und das Eindringmerkmal zu dem darunter liegenden Aluminiumlegierungs-Werkstück offen ist, das benachbart zu dem Stahlwerkstück liegt. Dies trifft speziell zu, wenn ein vollständig eindringendes Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung innerhalb des eingreifenden Aluminiumlegierungs-Werkstückes erzeugt wird, welches benachbart zu dem Stahlwerkstück liegt.

**[0014]** Es können viele Schweißelektroden-gestaltungen in Verbindung mit dem Eindringmerkmal in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück verwendet werden, was die Prozessflexibilität erleichtert. Es besteht insbesondere keine Notwendigkeit, Schweißelektroden zu verwenden, die strengen Größen- und Formanforderungen genügen, um Werkstückstapel erfolgreich punktzuschweißen, die benachbarte Stahl- und Aluminiumlegierungs-Werkstücke umfassen. Jede der Schweißelektroden kann daher mit anderen Zwecken im Sinn wie z. B. das Punktschweißen von Stahl an Stahl oder Aluminiumlegierung an Aluminiumlegierung gebaut werden. Als solche können die gleichen Schweißelektroden, die in der Regel zum Punktschweißen eines Aluminiumlegierungs-Werkstückes an ein Aluminiumlegierungs-Werkstück verwendet werden, auch zum Punktschweißen eines Stahlwerkstückes an ein Aluminiumlegierungs-Werkstück mithilfe des Eindringmerkmals verwendet werden, was bedeutet, dass der gleiche Schweißpistolenaufbau verwendet werden kann, um beide Sätze von Werkstückstapeln punktzuschweißen, ohne dass es notwendig ist, eine oder beide der Schweißelektroden auszuwechseln. Das Gleiche gilt auch für Schweißelektroden, die in der Regel zum Punktschweißen von Stahl an Stahl verwendet werden. Tatsächlich können einige Schweißelektroden sogar verwendet werden, um alle drei Sätze von Stapeln – d. h. Stahl an Stahl, Aluminiumlegierung an Aluminiumlegierung und Stahl an Aluminiumlegierung (mithilfe des Eindringmerkmals) punktzuschweißen.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

**[0015]** Fig. 1 ist eine seitliche Aufrissansicht eines Werkstückstapels, der gemäß einer Ausführungsform ein Stahlwerkstück und ein Aluminiumlegierungs-Werkstück umfasst, die an einer Schweißstelle in überlappender Weise zum Widerstandspunktschweißen zusammengesetzt sind, wobei das Aluminiumlegierungs-Werkstück benachbart zu dem Stahlwerkstück liegt und ein Eindringmerkmal umfasst;

**[0016]** Fig. 2 ist eine partielle, vergrößerte Querschnittsansicht des Werkstückstapels, und der entge-

gensetzten Schweißelektroden, die in Fig. 1 abgebildet sind;

**[0017]** Fig. 3 ist eine partielle, auseinandergezogene seitliche Querschnittsansicht des Werkstückstapels und der entgegengesetzten Schweißelektroden, die in Fig. 2 abgebildet sind;

**[0018]** Fig. 4 ist eine Querschnittsansicht eines in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück umfassten Eindringmerkmals gemäß einer Ausführungsform;

**[0019]** Fig. 5 ist eine Querschnittsansicht eines in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück umfassten Eindringmerkmals gemäß einer anderen Ausführungsform;

**[0020]** Fig. 6 ist eine Querschnittsansicht eines in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück umfassten Eindringmerkmals gemäß einer noch anderen Ausführungsform;

**[0021]** Fig. 7 ist eine Querschnittsansicht eines in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück umfassten Eindringmerkmals gemäß einer noch anderen Ausführungsform;

**[0022]** Fig. 8 ist eine Querschnittsansicht eines in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück umfassten Eindringmerkmals gemäß einer noch anderen Ausführungsform;

**[0023]** Fig. 9 ist eine partielle Querschnittsansicht eines Werkstückstapels, der gemäß einer Ausführungsform ein Stahlwerkstück und ein Aluminiumlegierungs-Werkstück umfasst, vor dem Durchgang eines elektrischen Stromes zwischen entgegengesetzten Schweißelektroden, wobei eine erste Schweißelektrode mit einer äußeren Oberfläche des Stahlwerkstückes in Kontakt steht und eine zweite Schweißelektrode mit einer äußeren Oberfläche des Aluminiumlegierungs-Werkstückes in Kontakt steht;

**[0024]** Fig. 10 ist eine partielle Querschnittsansicht des Werkstückstapels und, wie in Fig. 9 abgebildet, während des Punktschweißens, bei dem ein Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung innerhalb des Aluminiumlegierungs-Werkstückes und an der Stoßgrenzfläche des Stahl- und des Aluminiumlegierungs-Werkstückes initiiert wurde und außerdem ein Schmelzbad aus geschmolzenem Stahl innerhalb des Stahlwerkstückes initiiert wurde;

**[0025]** Fig. 11 ist eine partielle Querschnittsansicht des Werkstückstapels von Fig. 10 nach Unterbrechen des elektrischen Stromes und Zurückziehen der Schweißelektroden, wobei eine Schweißverbindung an der Stoßgrenzfläche des Stahl- und des Aluminiumlegierungs-Werkstückes gebildet wurde und eine

Schweißlinse innerhalb des Stahlwerkstückes gebildet wurde;

**[0026] Fig. 12** ist eine idealisierte Illustration, welche die Richtung der Erstarrungsfront in einem Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung zeigt, die von dem Punkt der kälteren Schweißelektrode am nächsten, die gegen das Aluminiumlegierungs-Werkstück angeordnet ist, in Richtung der Stoßgrenzfläche erstarrt, wenn keine Eindringmerkmal in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück umfasst ist;

**[0027] Fig. 13** ist eine idealisierte Illustration, welche die Richtung der Erstarrungsfront in einem Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung zeigt, wenn das Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung infolge eines Eindringmerkmals, das in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück umfasst ist, von seinem äußeren Umfang in Richtung seines Zentrums erstarrt;

**[0028] Fig. 14** ist eine seitliche Aufrissansicht eines Werkstückstapels, der gemäß einer anderen Ausführungsform ein Stahlwerkstück, ein benachbartes Aluminiumlegierungs-Werkstück und ein zweites Stahlwerkstück umfasst, die in überlappender Weise zum Widerstandspunktschweißen zusammengesetzt sind, wobei das Aluminiumlegierungs-Werkstück ein Eindringmerkmal umfasst; und

**[0029] Fig. 15** ist eine seitliche Aufrissansicht eines Werkstückstapels, der gemäß einer noch anderen Ausführungsform ein Stahlwerkstück, ein Aluminiumlegierungs-Werkstück und ein zweites Aluminiumlegierungs-Werkstück umfasst, das zwischen dem Stahl- und dem Aluminiumlegierungs-Werkstück angeordnet ist, wobei das Aluminiumlegierungs-Werkstück, das einen Kontakt mit den Schweißelektroden herstellt, aber nicht benachbart zu dem Stahlwerkstück liegt, ein Eindringmerkmal umfasst.

#### DETAILLIERTE BESCHREIBUNG

**[0030]** Bevorzugte und exemplarische Ausführungsformen eines Verfahrens zum Punktschweißen eines Werkstückstapels, der ein Stahlwerkstück und ein benachbartes Aluminiumlegierungs-Werkstück umfasst, sind in den **Fig. 1–Fig. 15** gezeigt und unten stehend beschrieben. Die beschriebenen Ausführungsformen verwenden ein Eindringmerkmal in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück, das durch eine Schweißelektrode auf seiner Seite des Werkstückstapels kontaktiert wird, um das Flussmuster und die Dichte des elektrischen Stromes zu beeinflussen, der durch die Werkstücke fließt. Infolge des Eindringmerkmals, welches nachstehend in näherem Detail beschrieben ist, nimmt der elektrische Strom ein konisches Flussmuster innerhalb zumindest des Aluminiumlegierungs-Werkstückes an, das benachbart zu dem Stahlwerkstück liegt, sodass sich

der Weg des Stromflusses radial in Richtung der Schweißelektrode in Kontakt mit dem Aluminiumlegierungs-Werkstück ausdehnt, welches das Eindringmerkmal umfasst (welches dasselbe wie oder ein anderes als das Aluminiumlegierungs-Werkstück sein kann, das benachbart zu dem Stahlwerkstück liegt). Das konische Flussmuster hilft dabei, eine starke Schweißverbindung zwischen den benachbarten Stahl- und Aluminiumlegierungs-Werkstücken zu bilden, indem es dreidimensionale Temperaturgradienten um das Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung erzeugt, welche das Erstarrungsverhalten des Schmelzbades verändern. Überdies verstärkt das Eindringmerkmal in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück, welches durch die Schweißelektrode kontaktiert wird, die plastische Verformung an der Stoßgrenzfläche und es kann ein/en offenen/s Raum oder Volumen bereitstellen, welcher/s eine Bewegung des Schmelzbades aus geschmolzener Aluminiumlegierung während eines Stromflusses zulässt, die dabei hilft, die Festigkeit und die mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung weiter zu verbessern, indem sie durch Oxidreste in der Nähe der Stoßgrenzfläche der benachbarten Stahl- und Aluminiumlegierungs-Werkstücke verursachte Fehlstellen aufbricht und umverteilt.

**[0031]** Die **Fig. 1–Fig. 3** zeigen allgemein einen Werkstückstapel **10**, der ein Stahlwerkstück **12** und ein Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** umfasst, die in dieser Ausführungsform benachbart zueinander liegen. Das Stahlwerkstück **12** ist bevorzugt ein verzinkter (mit Zink beschichteter) kohlenstoffarmer Stahl. Es können selbstverständlich auch andere Arten von Stahlwerkstücken, beispielsweise u. a. kohlenstoffarmer, blanker Stahl oder verzinkter „Advanced High Strength“ Stahl (AHSS) verwendet werden. Einige spezifische Arten von Stählen, die in dem Stahlwerkstück **12** verwendet werden können, umfassen „Interstitial-free“ (IF)-Stahl, Dualphasen (DP)-Stahl, „Transformation-Induced Plasticity“ (TRIP)-Stahl und pressgehärteten Stahl (PHS vom engl. press-hardened steel). Was das Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** betrifft, so kann es eine Aluminium-Magnesium-Legierung, eine Aluminium-Silizium-Legierung, eine Aluminium-Magnesium-Silizium-Legierung oder eine Aluminium-Zink-Legierung sein, und es kann mit seiner natürlichen feuerfesten Oxidschicht beschichtet sein, oder es kann alternativ mit Zink, Zinn oder einer Konversionsbeschichtung beschichtet sein, um das Klebevermögen zu verbessern. Einige spezifische Aluminiumlegierungen, die in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** verwendet werden können, umfassen die Aluminium-Magnesium-Legierung AA5754, die Aluminium-Magnesium-Silizium-Legierung AA6111 und AA6022 und die Aluminium-Zink-Legierung AA7003. Der Ausdruck „Werkstück“ und seine Stahl- und Aluminiumvarianten werden in der vorliegenden Offenbarung weitläufig verwendet, um sich auf eine bearbeitete-

te Metallblechschicht, ein Gussteil, ein Strangpresseteil oder jedes andere widerstandspunktschweißbare Substrat einschließlich jeglicher Oberflächenschichten oder -beschichtungen, falls vorhanden, zu beziehen.

**[0032]** Das Stahl- und das Aluminiumlegierungs-Werkstück **12**, **14** sind in überlappender Weise zum Widerstandspunktschweißen mit einer Schweißpistole **18** an einer vorbestimmten Schweißstelle **16** zusammengesetzt. Wenn es zum Punktschweißen gestapelt ist, umfasst das Stahlwerkstück **12** eine Stoßfläche **20** und eine äußere Oberfläche **22**. Gleichermaßen umfasst das Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** eine Stoßfläche **24** und eine äußere Oberfläche **26**. Die Stoßflächen **20**, **24** der beiden Werkstücke **12**, **14** überlappen einander, um eine Stoßgrenzfläche **28** an der Schweißstelle **16** herzustellen. Die Stoßgrenzfläche **28**, wie hierin verwendet, umfasst Fälle eines direkten Kontakts zwischen den Stoßflächen **20**, **24** der Werkstücke **12**, **14** wie auch Fälle eines indirekten Kontakts wie z. B., wenn sich die Stoßflächen **20**, **24** nicht berühren, sich aber nahe genug nebeneinander befinden – z. B. wenn eine dünne Schicht aus Kleber, Porenfüller oder ein anderes dazwischen befindliches Material vorhanden ist – dass ein Widerstandspunktschweißen dennoch durchgeführt werden kann. In einigen Fällen kann eine dünne Beschichtung aus Porenfüller oder Kleber zwischen den Stoßflächen **20**, **24** der Werkstücke **12**, **14** aufgebracht werden, um dabei zu helfen, die Werkstücke **12**, **14** entlang ihrer Stoßgrenzfläche **28** zusammenzuhalten.

**[0033]** Die äußeren Oberflächen **22**, **26** des Stahl- und des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **12**, **14** weisen andererseits allgemein voneinander weg in entgegengesetzte Richtungen, um sie für ein Paar entgegengesetzter Punktschweißelektroden zugänglich zu machen. Hier, in dieser Ausführungsform, stellt die äußere Oberfläche **22** des Stahlwerkstückes **12** eine erste Seite **30** des Werkstückstapels **10** bereit und dar, und die äußere Oberfläche **26** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** stellt eine zweite Seite **32** des Werkstückstapels **10** bereit und dar. Jedes von dem Stahl- und dem Aluminiumlegierungs-Werkstück **12**, **14** weist bevorzugt eine Dicke **120**, **140** auf – die von der Stoßfläche **20**, **24** zu der äußeren Oberfläche **22**, **26** jedes Werkstückes **12**, **14** gemessen wird – welche in einem Bereich von 0,3 mm bis 6,0 mm, und stärker bevorzugt von 0,5 mm bis 4,0 mm zumindest an der Schweißstelle **16** liegt.

**[0034]** Die Schweißpistole **18**, die zum Punktschweißen des Werkstückstapels **10** und zum Zusammenfügen des Stahl- und des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **12**, **14** an ihrer Stoßgrenzfläche **28** verwendet wird, kann von jeder bekannten Art sein. Zum Beispiel, wie hier in den **Fig. 1–Fig. 2** gezeigt, umfasst die Schweißpistole **18**, die Teil eines größeren au-

tomatisierten Schweißablaufes ist, einen ersten Pistolarm **34** und einen zweiten Pistolarm **36**, die mechanisch und elektrisch ausgestaltet sind, um wiederholt Punktschweißnähte gemäß einem definierten Schweißplan zu bilden. Der erste Pistolarm **34** weist eine erste Elektrodenhalterung **38** auf, welche eine erste Schweißelektrode **40** festhält, und der zweite Pistolarm **36** weist eine zweite Elektrodenhalterung **42** auf, welche eine zweite Schweißelektrode **44** festhält. Die erste und die zweite Schweißelektrode **40**, **44** sind jeweils bevorzugt aus einem elektrischen leitfähigen Material wie z. B. einer Kupferlegierung gebildet. Ein spezifisches Beispiel ist eine Zirkonium-Kupfer-Legierung (ZrCu), die 0,10 Gew.-% bis 0,20 Gew.-% Zirkonium und als Rest Kupfer enthält. Kupferlegierungen, die dieser Bestandteilzusammensetzung entsprechen und als C15000 bezeichnet werden, sind bevorzugt. Selbstverständlich können auch andere Kupferlegierungs-Zusammensetzungen verwendet werden, die geeignete mechanische und elektrische Leitfähigkeitseigenschaften besitzen. Die in den **Fig. 1–Fig. 2** allgemein gezeigte Schweißpistole **18** ist als für eine breite Vielfalt von Schweißpistolen, u. a. c- und x-Schweißpistolen wie auch andere Schweißpistolen, die nicht speziell erwähnt sind, sofern sie zum Punktschweißen des Werkstückstapels **10** in der Lage sind, stehend zu verstehen.

**[0035]** Die erste Schweißelektrode **40** umfasst eine erste Schweißfläche **46** und die zweite Schweißelektrode **44** umfasst eine zweite Schweißfläche **48**. Die Schweißflächen **46**, **48** der ersten und der zweiten Schweißelektroden **40**, **44** sind die Abschnitte der Elektroden **40**, **44**, die während des Punktschweißens gegen die erste Seite **30** bzw. die zweite Seite **32** des Werkstückstapels **10**, welche in dieser Ausführungsform auch die äußere Oberfläche **22** des Stahlwerkstückes **12** und die äußere Oberfläche **26** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** gepresst und in diese eingedrückt werden. Jede der Schweißflächen **46**, **48** kann flach oder gewölbt sein und kann ferner Oberflächenmerkmale (z. B. Oberflächenrauigkeit, Ringmerkmale, ein Plateau etc.) umfassen, wie z. B. in den U.S.-Patenten Nr. 6,861,609, 8,222,560, 8,274,010, 8,436,269, 8,525,066 und 8,927,894 beschrieben. Ein Mechanismus zum Kühlen der Elektroden **40**, **44** mit Wasser ist in der Regel in die Pistolarme **34**, **36** und die Elektrodenhalterungen **38**, **42** eingebaut, um die Temperaturen der Schweißelektroden **40**, **44** zu regeln.

**[0036]** Die Schweißpistolarme **34**, **36** sind während des Punktschweißens betreibbar, um die Schweißflächen **46**, **48** der Schweißelektroden **40**, **44** gegen die äußere Oberfläche **22** des Stahlwerkstückes **12** bzw. die äußere Oberfläche **26** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** zu pressen. Die erste und die zweite Schweißfläche **46**, **48** werden in der Regel gegen ihre jeweiligen äußeren Oberflächen **22**,

**26** in flächiger, axialer Ausrichtung zueinander an der vorgesehenen Schweißstelle **16** gepresst. Dann wird ein elektrischer Strom von einer steuerbaren Leistungsquelle (nicht gezeigt) in elektrischer Verbindung mit der Schweißpistole **18** zugeführt. Der angelegte elektrische Strom wird zwischen die Schweißelektroden **40, 44** geleitet. Die Stärke und die Dauer des elektrischen Stromes sind durch einen Schweißplan festgelegt, der spezifisch programmiert ist, um das Zusammenfügen des Stahl- und des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **12, 14** zu bewirken.

**[0037]** Nunmehr speziell Bezug nehmend auf die **Fig. 2–Fig. 4** umfasst das Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** ein Eindringmerkmal **50**, das innerhalb der Schweißstelle **16** ausgerichtet und angeordnet ist. Das Eindringmerkmal **50** kann sich teilweise oder vollständig zwischen den stoßenden und äußeren Oberflächen **24, 26** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** erstrecken, um einen Leerraum innerhalb des Werkstückes **14** bereitzustellen. Wenn sie zu Beginn des Stromflusses gegen die äußere Oberfläche **26** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** gepresst wird, stellt die Schweißfläche **48** der zweiten Schweißelektrode **44** einen Kontakt mit der äußeren Oberfläche **26** über dem Eindringmerkmal **50** her. Anders ausgedrückt, wenn die umlaufende Grenze des Oberflächenbereiches der äußeren Oberfläche **26**, die zu Beginn des Stromflusses durch die Schweißfläche **48** kontaktiert wird, nach unten zu der Stoßfläche **24** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** projiziert wird, wie hier durch die Bezugsziffer **52** (**Fig. 4**) illustriert, würde das Eindringmerkmal **50** vollständig innerhalb dieser dargestellten Region eingeschlossen. Diese Beziehung zwischen dem kontaktierten Bereich der äußeren Oberfläche **26** und dem Eindringmerkmal **50** ist unabhängig davon gültig, ob das Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** das obere oder das untere Werkstück in dem Stapel **10** ist. Demzufolge ist der Ausdruck „über“ nicht so zu verstehen, dass das Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** sich immer oben auf dem Stahlwerkstück **12** befinden muss, sodass sich die zweite Schweißelektrode **44** genau genommen über dem Eindringmerkmal **50** befindet.

**[0038]** Das Eindringmerkmal **50** bewirkt, dass der elektrische Strom zwischen den Schweißelektroden **40, 44** ausgetauscht wird, um ein konisches Flussmuster innerhalb des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** um das Eindringmerkmal **50** herum zumindest beim Einsetzen des Stromflusses anzunehmen, wie durch die Pfeile **54** (**Fig. 4**) dargestellt. Das durch das Eindringmerkmal **50** induzierte konische elektrische Stromflussmuster **54** dehnt sich radial von der Stoßgrenzfläche **28** in Richtung der zweiten Schweißelektrode **44** aus. Es weist auch einen kreisringförmigen Querschnitt an der Grenzfläche der Schweißfläche **48** der zweiten Schweißelektrode **44** und der äußeren Oberfläche **26** des Aluminiumlegierungs-

Werkstückes **14** auf. Durch Induzieren des konischen Flussmusters **54** und somit Verringern der Stromdichte in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** gerichtet von der Stoßgrenzfläche **28** in Richtung der zweiten Schweißelektrode **44** wird Wärme innerhalb einer kleineren Zone in dem Stahlwerkstück **12** verglichen mit dem Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** konzentriert. Wie nachstehend weiter erklärt wird, erzeugt der Akt des Konzentrierens von Wärme innerhalb einer kleineren Zone in dem Stahlwerkstück **12** dreidimensionale Temperaturgradienten – insbesondere radiale Temperaturgradienten, die in der Ebene beider Werkstücke **12, 14** wirksam sind – die das Erstarrungsverhalten des an der Stoßgrenzfläche **28** initiierten und zum Wachsen gebrachten Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung verändern, sodass Fehlstellen in der schließlich gebildeten Schweißverbindung an eine ungefährlichere Stelle geleitet werden.

**[0039]** Außer dass es den Stromfluss durch das Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** hindurch ändert, hilft das Eindringmerkmal **50** dabei, die nachteiligen Folgen der auf der Stoßfläche **24** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** Oberflächenoxidschicht/en, welche an der Schweißstelle **16** vorhanden sein kann/können zu minimieren. Die Annahme an dieser Stelle ist so, dass sich der Abschnitt des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** in der unmittelbar umgebenden Nähe des Eindringmerkmals **50** durch den von der zweiten Schweißelektrode **44** übertragenen Druck leichter plastisch verformt wird. Solche eine verstärkte plastische Verformung zerbricht und bricht die feuerfeste/n Oxidschicht/en auf, welche die Stoßfläche **24** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** bedeckt/en, was zulässt, dass das Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung die benachbarte Stoßfläche **20** des Stahlwerkstückes **12** besser benetzt, und bricht außerdem den feuerfesten Oxidrest auf, der in das Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung eingebaut wird und für eine Quelle von grenzflächennahen Fehlstellen innerhalb des wachsenden Schmelzbad sorgt.

**[0040]** Das Eindringmerkmal **50** kann in vielerlei Weise gebaut sein. Gemäß einer spezifischen Ausführungsform, die in **Fig. 4** gezeigt ist, kann das Eindringmerkmal **50** eine Durchgangsbohrung **56** sein, die sich zwischen der Stoß- und der äußeren Oberfläche **24, 26** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** erstreckt, um die Dicke **140** des Werkstückes **14** vollständig zu durchqueren. Das Eindringmerkmal **50** muss sich jedoch nicht unbedingt in dieser Weise über die ganze Strecke durch das Werkstück **14** hindurch erstrecken. Gemäß einer anderen Ausführungsform, wie in **Fig. 5** gezeigt, kann das Eindringmerkmal **50** z. B. eine Vertiefung **58** sein, welche die Dicke **104** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** teilweise quert und sich von der Stoßfläche **24** des Werkstückes **14** weg erstreckt, aber die äußere Ober-

fläche **26** nicht erreicht. In ähnlicher Weise kann das Eindringmerkmal **50** gemäß einer anderen Ausführungsform, wie in **Fig. 6** gezeigt, eine Vertiefung **60** sein, welche die Dicke **40** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** teilweise quert, sich dieses Mal von der äußeren Oberfläche **26** des Werkstückes **14** weg erstreckt, aber die Stoßfläche **24** nicht erreicht. Die in den **Fig. 5–Fig. 6** gezeigten Eindringmerkmale **50** sind dabei hilfreich, Porenfüller oder Kleber, die gelegentlich zwischen den Werkstücken **12, 14** an der Schweißstelle **16** aufgebracht werden, davon abzuhalten, mit der Schweißfläche **48** der zweiten Schweißelektrode **44** in Kontakt zu gelangen.

**[0041]** Ferner kann das Eindringmerkmal **50**, wie in den **Fig. 7–Fig. 8** gezeigt, mit einem erhöhten Ring **62** kombiniert werden, der das Eindringmerkmal **50** bevorzugt kontinuierlich umgibt. Der erhöhte Ring **62** kann eine Folge des Ausbildungsvorganges sein, der verwendet wurde, um das Eindringmerkmal **50** herzustellen, z. B. Prägen oder die Verwendung eines Stempels und eines Gesenks. Wie in **Fig. 7** gezeigt, kann das Eindringmerkmal **50** eine Vertiefung **64** sein, welche die Dicke **40** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** teilweise quert und sich von der Stoßfläche **24** des Werkstückes **14** weg erstreckt, aber die äußere Oberfläche **26** nicht erreicht, und der erhöhte Ring **62** kann die Stoßgrenzfläche **28** mit dem Stahlwerkstück **12** herstellen. Da der erhöhte Ring **62** über der Stoßfläche **24** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** an der Schweißstelle **16** vorsteht, ist die Stoßfläche **24** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14**, welche den erhöhten Ring **62** umgibt, von der Stoßfläche **20** des Stahlwerkstückes **12** zu Beginn des Stromflusses durch einen Zwischenraum **66** getrennt. Gemäß einer anderen Ausführungsform kann das Eindringmerkmal **50**, wie in **Fig. 8** gezeigt, eine Vertiefung **68** sein, welche die Dicke **140** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** teilweise quert, sich dieses Mal von der äußeren Oberfläche **26** des Werkstückes **14** weg erstreckt, aber die Stoßfläche **24** nicht erreicht. Der hier verwendete erhöhte Ring **62** stellt während des Punktschweißens einen Kontakt mit der Schweißfläche **48** der zweiten Schweißelektrode **44** her. Der erhöhte Ring **62** kann auch mit einer Durchgangsbohrung wie der in **Fig. 1** abgebildeten wie auch anderen Eindringmerkmalbauformen verwendet werden, wenngleich in den Zeichnungen nicht ausdrücklich gezeigt.

**[0042]** Unabhängig von seiner exakten Bauform ist das Eindringmerkmal **50** bevorzugt in Übereinstimmung mit bestimmten Metriken dimensioniert, um sicherzustellen, dass es den elektrischen Stromfluss zwischen der ersten und der zweiten Schweißelektrode **40, 44** maßgeblich beeinflusst. Das Eindringmerkmal **50** weist beispielsweise bevorzugt einen Durchmesser auf, der größer ist als die Dicke **140** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** an der Schweißstelle **16**. Unter diesen Umständen kann der minima-

le Durchmesser des Eindringmerkmals **50** abhängig von der Dicke **140** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** in einem Bereich zwischen 2 mm und 8 mm, und enger zwischen 3 mm und 6 mm liegen. Außerdem ist das innere Volumen des Eindringmerkmals **50** bevorzugt groß genug, um die feuerfeste/n Oxidschicht/en zu sprengen, die an der Stoßgrenzfläche **28** vorhanden sein kann/können. Das Versehen des inneren Merkmals **50** mit einem inneren Volumen von mehr als 2 mm<sup>3</sup> und bevorzugt mehr als 6 mm<sup>3</sup> ist für diesen Zweck ausreichend.

**[0043]** Die in den **Fig. 4–Fig. 5** und **Fig. 7** gezeigten Eindringmerkmale **50** (Merkmale **56, 58** und **64**) sind beispielhafte Merkmale, die zu der Stoßfläche **20** des Stahlwerkstückes **12** offen sind. Unter diesen Umständen stellen die Eindringmerkmale **50** in den **Fig. 4–Fig. 5** und **Fig. 7** wie auch andere Eindringmerkmale, die ebenfalls offen, an dieser Stelle aber nicht ausdrücklich gezeigt sind, ein/en offenen/s Raum oder Volumen bereit, welcher/s eine Bewegung des Schmelzbades aus geschmolzener Aluminiumlegierung während seiner/s Initiierung und Wachstums innerhalb des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** zulässt. Diese Art von Bewegung oder Rühren des Schmelzbades aus geschmolzener Aluminiumlegierung kann die mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung durch Aufbrechen und Umverteilen von Oxidrest-Fehlstellen, die oft in der Nähe der Stoßgrenzfläche **28** anzutreffen sind, verbessern.

**[0044]** Die **Fig. 1–Fig. 2** und **Fig. 9–Fig. 11** illustrieren eine Ausführungsform eines Punktschweißprozesses, bei dem der Werkstückstapel **10** an der Schweißstelle **16** punktgeschweißt wird, um die benachbarten Stahl- und Aluminiumlegierungs-Werkstücke **12, 14** mithilfe des in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** enthaltenen Eindringmerkmals **50** zusammenzufügen. Zunächst wird der Werkstückstapel **10** zwischen der ersten und der zweiten Schweißelektrode **40, 44** angeordnet, sodass die entgegengesetzten Schweißflächen **46, 48** an der Schweißstelle **16** flächig ausgerichtet sind. Der Werkstückstapel **10** kann an eine solche Stelle gebracht werden, wie es oft der Fall ist, wenn die Pistolendarme **34, 36** Teil eines feststehenden Sockelschweißgeräts sind, oder die Pistolendarme **34, 36** können roboter-technisch bewegt werden, um die Schweißelektroden **40, 44** bezüglich der Schweißstelle **16** anzuordnen.

**[0045]** Sobald der Werkstückstapel **10** korrekt angeordnet ist, laufen der erste und der zweite Pistolendarme **34, 36** relativ zueinander zusammen, um die Schweißflächen **46, 48** der ersten und der zweiten Schweißelektrode **40, 44** in Kontakt zu bringen und gegen die entgegengesetzte ersten und zweiten Seiten **30, 32** des Werkstückstapels **10** zu pressen, wie in **Fig. 9** gezeigt. Hier, in dieser Ausführungsform, wird die Schweißfläche **46** der ersten Schweißelek-

trode **40** gegen die äußere Oberfläche **22** des Stahlwerkstückes **12** gepresst, und die Schweißfläche **48** der zweiten Schweißelektrode **44** wird über dem Eindringmerkmal **50** gegen die in die entgegengesetzte Richtung weisende äußere Oberfläche **26** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** gepresst. Die durch die Pistolennarmer **34, 36** festgelegte Klemmkraft hilft dabei, einen guten mechanischen und elektrischen Kontakt zwischen den Schweißelektroden **40, 44** und den äußeren Oberflächen **22, 26** in die sie eingreifen, herzustellen. Sie hilft auch dabei, durch plastisches Verformen des Abschnitts des Werkstückes **14**, der das Eindringmerkmal **50** umgibt, die Oberflächenoxidschichten zu zerbrechen, die auf der Stoßfläche **24** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** vorhanden sein kann/können.

**[0046]** Dann wird ein elektrischer Strom – in der Regel ein Gleichstrom zwischen etwa 5 kA und etwa 50 kA – zwischen die Schweißflächen **46, 48** und durch den Werkstückstapel **10** an der Schweißstelle **16** geleitet, wie durch den Schweißplan vorgegeben. Der elektrische Strom wird in der Regel als ein konstanter Strom oder als eine Reihe von Stromimpulsen über eine Dauer von 40 Millisekunden bis 1000 Millisekunden durchgeleitet. Zumindest zu Beginn des Stromflusses bewirkt das Eindringmerkmal **50**, dass der Strom das konische Flussmuster **54** (**Fig. 4–Fig. 8**) innerhalb des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** annimmt. Das konische Flussmuster **54** entwickelt sich, da das Eindringmerkmal **50** einen elektrisch isolierenden Leerraum innerhalb des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** zwischen den Schweißflächen **46, 48** der flächig ausgerichteten ersten und zweiten Schweißelektrode **40, 44** bereitstellt. Das Vorhandensein solch eines elektrisch isolierenden Leerraumes zwingt den elektrischen Strom dazu, sich radial von der Stoßgrenzfläche **28** in Richtung der zweiten Schweißelektrode **44** auszudehnen und außerdem einen kreisringförmigen Querschnitt an der Grenzfläche der ersten Schweißfläche **48** der zweiten Schweißelektrode **44** und der äußeren Oberfläche **26** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** zu definieren, wo der elektrische Strom am stärksten konzentriert ist, wie zuvor beschrieben. Andererseits leitet die erste Schweißelektrode **40** den elektrischen Strom durch eine stärker konzentrierte Querschnittsfläche innerhalb des Stahlwerkstückes **12**.

**[0047]** Der Durchgang des elektrischen Stromes zwischen den Schweißelektroden **40, 44** und durch den Werkstückstapel **10** bewirkt, dass sich das Stahlwerkstück **12** anfänglich schneller erwärmt als das Aluminiumlegierungs-Werkstück **14**, da es einen höheren thermischen und elektrischen Widerstand aufweist. Die aus dem Widerstand gegen den Fluss von elektrischem Strom über die Stoßgrenzfläche **28** hinweg erzeugte Wärme bringt schließlich – in Verbindung mit der Wärme, die von dem Stahlwerkstück in das Aluminiumlegierungs-Werkstück hinein

fließt – das Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** an der Schweißstelle **16** zum Schmelzen und initiiert ein Schmelzbad **70** aus geschmolzener Aluminiumlegierung, wie in **Fig. 10** gezeigt. Das fortgesetzte Leiten des elektrischen Stromes durch die Werkstücke **12, 14** bringt schließlich das Schmelzbad **70** aus geschmolzener Aluminiumlegierung zum Wachsen bis zu der erwünschten Größe, was in vielen Fällen zur Folge hat, dass das Schmelzbad **70** vollständig durch die gesamte Dicke **140** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** eindringt. Während dieser Zeit benetzt das Schmelzbad **70** aus geschmolzener Aluminiumlegierung einen benachbarten Bereich der Stoßfläche **20** des Stahlwerkstückes **12**. Das Schmelzbad **70** aus geschmolzener Aluminiumlegierung kann das Eindringmerkmal **50** zumindest teilweise und oft vollständig mit füllen.

**[0048]** Das Induzieren des konischen elektrischen Stromflussmusters **54** innerhalb des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** hat zur Folge, dass Wärme innerhalb einer kleineren Zone in dem Stahlwerkstück **12** verglichen mit dem Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** konzentriert wird. Da in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** Wärme weniger konzentriert wird, wird den umliegenden Abschnitten des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** außerhalb der Schweißstelle **16** weniger Schaden zugefügt. Der Schweißplan kann als solcher falls gewünscht, festgelegt werden, um ein Schmelzbad **72** aus geschmolzenem Stahl innerhalb der Grenzen des Stahlwerkstückes **12** zu initiieren und zum Wachsen zu bringen, außer dass das Schmelzbad **70** aus geschmolzener Aluminiumlegierung innerhalb des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** und an der Stoßgrenzfläche **28** initiiert und zum Wachsen gebracht wird. **Fig. 10** illustriert das Vorhandensein sowohl des Schmelzbades **70** aus geschmolzener Aluminiumlegierung als auch des Schmelzbades **72** aus geschmolzenem Stahl. Die durch den elektrischen Strom erzeugte Wärme muss jedoch nicht immer so in dem Stahlwerkstück **12** konzentriert sein, dass das Schmelzbad **68** aus geschmolzenem Stahl erzeugt wird.

**[0049]** Nach Aufhören des elektrischen Stromflusses erstarrt das Schmelzbad **70** aus geschmolzener Aluminiumlegierung, um eine Schweißverbindung **74** zu bilden, welche das Stahl- und das Aluminiumlegierungs-Werkstück **12, 14** an der Stoßgrenzfläche **28** aneinander bindet, wie in **Fig. 11** allgemein illustriert. Gleichermaßen erstarrt zu diesem Zeitpunkt das Schmelzbad **72** aus geschmolzenem Stahl, falls gebildet, zu einer Stahlschweißlinse **76** innerhalb des Stahlwerkstückes **12**, wenngleich es sich bevorzugt nicht bis zu entweder der Stoßfläche **20** oder der äußeren Oberfläche **22** des Werkstückes **12** erstreckt. Schließlich werden die Schweißelektroden **40, 44** von der Schweißstelle **16** zurückgezogen und an einer anderen Schweißstelle neu positioniert, um einen ähnlichen Punktschweißprozess durchzuführen. Das

Zurückziehen der ersten und der zweiten Schweißelektrode **40**, **44** lässt eine eingedrückte Kontaktfläche **78** auf der äußeren Oberfläche **22** des Stahlwerkstückes **12** und eine eingedrückte Kontaktfläche **80** auf der äußeren Oberfläche **26** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** zurück. Die Kontaktfläche **80** auf dem Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** weist üblicherweise eine größere Oberfläche auf als die Kontaktfläche **78** des Stahlwerkstückes **12**.

**[0050]** Die Schweißverbindung **74** umfasst eine Aluminiumlegierungs-Schweißlinse **82** und in der Regel eine oder mehreren Reaktionsschichten **84** der intermetallischen Fe-Al-Verbindungen. Die Aluminiumlegierungs-Schweißlinse **82** dringt bis zu einer Distanz in das Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** ein, die 20% der Dicke **140** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** überschreitet, und durchdringt die Gesamtdicke **140** des Werkstückes **14** oft vollständig (d. h. 100%). Die eine oder mehreren Reaktionsschicht/en **84** aus intermetallischen Fe-Al-Verbindungen, falls vorhanden, befindet/n sich zwischen der Masse der Aluminiumlegierungs-Schweißlinse **82** und dem Stahlwerkstück **12**. Diese Schichten werden hauptsächlich infolge einer Reaktion zwischen dem Schmelzbad **70** aus geschmolzener Aluminiumlegierung und dem Stahlwerkstück **12** bei Punktschweißtemperaturen während eines Stromflusses und für eine kurze Zeitspanne nach einem Stromfluss, wenn das Stahlwerkstück **12** noch immer heiß ist, erzeugt. Die eine oder mehreren Schicht/en **84** aus intermetallischen Fe-Al-Verbindungen kann/können Intermetalle wie z. B.  $\text{FeAl}_3$  und  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  wie auch andere umfassen, und deren kombinierte Dicke liegt in der Regel in einem Bereich von 1  $\mu\text{m}$  bis 3  $\mu\text{m}$ , wenn sie in der gleichen Richtung wie die Dicken **120**, **140** der Werkstücke **12**, **14** in zumindest dem Abschnitt der Schweißverbindung **74** unter der Stelle, wo das Eindringmerkmal **50** vorhanden war, gemessen wird. Eine Gesamtdicke der intermetallischen Reaktionsschicht/en von 1  $\mu\text{m}$  bis 3  $\mu\text{m}$  an dieser Stelle ist dünner, als normalerweise zu erwarten wäre, wenn das Eindringmerkmal **50** nicht verwendet wird.

**[0051]** Wie oben angesprochen, nimmt man an, dass das Induzieren des konischen elektrischen Stromflussmusters **54** innerhalb des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** das Erstarrungsverhalten des Schmelzbades **70** aus geschmolzener Aluminiumlegierung verändert, um so die Festigkeit und Integrität der Schweißverbindung **74** zusätzlich zu den anderen vorteilhaften Eigenschaften in Verbindung mit dem Eindringmerkmal **50** auf zumindest eine von zwei Arten zu verbessern. Erstens ändert die Zone konzentrierter Wärme innerhalb des Stahlwerkstückes **12** die Temperaturverteilung durch die Schweißstelle **16** durch Erzeugen von dreidimensionalen radialen Temperaturgradienten innerhalb der Ebene des Stahlwerkstückes **12**, die in der Ebene des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** widerge-

spiegelt werden. Die erweiterten radialen Temperaturgradienten helfen wiederum dabei, Wärme seitlich durch die Werkstücke **12**, **14** hindurch zu streuen, was bewirkt, dass das Schmelzbad **70** aus geschmolzener Aluminiumlegierung von seinem äußeren Umfang in Richtung seines Zentrums im Gegensatz zu gerichtet in Richtung der Stoßgrenzfläche **28** erstarrt. Dieses Erstarrungsverhalten reißt oder treibt Schweißfehler von dem Linsenumfang weg und in Richtung des Zentrums der Schweißverbindung **74**, wo sie weniger dazu neigen, die Fugestelle **74** zu schwächen und ihre strukturelle Integrität zu stören.

**[0052]** Die Fig. 12–Fig. 13 helfen dabei, das Erstarrungsverhalten zu visualisieren, von dem man annimmt, dass es als Resultat auftritt, wenn das Eindringmerkmal **50** in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** vorhanden ist. In Fig. 12, wo kein Eindringmerkmal in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** vorhanden ist, erstarrt ein Schmelzbad **86** aus geschmolzener Aluminiumlegierung von dem Punkt, welcher der kälteren Schweißelektrode **88**, die gegen das Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** angeordnet ist, am nächsten liegt, in Richtung der Stoßgrenzfläche **90**, was demzufolge Schweißfehler in Richtung und entlang der Stoßgrenzfläche **90** treibt. Hingegen erstarrt in Fig. 13, wo das Eindringmerkmal **50** in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** vorhanden ist, das Schmelzbad **86** aus geschmolzener Aluminiumlegierung von seinem äußeren Umfang **92** in Richtung seines Zentrums, was Schweißfehler dazu treibt, sich mehr in dem Zentrum der letztlich gebildeten Schweißverbindung anzusammeln, und deren Verteilung an und entlang der Stoßgrenzfläche **90** begrenzt, was zu einer stärkeren Schweißverbindung führt.

**[0053]** Zweitens neigt in Fällen, in denen das Schmelzbad **72** aus geschmolzenem Stahl initiiert und zum Wachsen gebracht wird, die Stoßfläche **20** des Stahlwerkstückes **12** dazu, sich von der äußeren Oberfläche **22** weg zu verziehen. Dieses Verziehen kann bewirken, dass sich das Stahlwerkstück **12** an der Schweißstelle **16** um bis zu 50% verdickt. Das Vergrößern der Dicke **120** des Stahlwerkstückes **12** in dieser Weise hilft dabei, eine erhöhte Temperatur an dem Zentrum des Schmelzbades **70** aus geschmolzener Aluminiumlegierung aufrechtzuerhalten – wodurch zugelassen wird, dass der Bereich des Schmelzbades **70** zuletzt abkühlt und erstarrt – was radiale Temperaturgradienten weiter erhöhen und Schweißfehler in Richtung des Zentrums der Schweißverbindung **74** treiben kann. Die Verdickung der Stoßfläche **20** des Stahlwerkstückes **12** kann auch die Bildung der einen oder mehreren Reaktionsschichten **84** aus intermetallischen Fe-Al-Verbindungen behindern oder unterbrechen, welche dazu neigt/en, sich an der Grenzfläche des Schmelzbades **70** aus geschmolzener Aluminiumlegierung und der Stoßfläche **20** des Stahlwerkstückes **12** zu bilden.

Überdies kann, sobald die Schweißverbindung **74** in Gebrauch ist, die Verdickung der Stoßfläche **20** des Stahlwerkstückes **12** eine Rissfortpflanzung um die Schweißverbindung **74** herum durch Ablenken von Rissen entlang eines nicht bevorzugten Weges behindern.

**[0054]** Die oben beschriebenen und in den **Fig. 1–Fig. 13** gezeigten Ausführungsformen zielen auf Fälle ab, in denen der Werkstückstapel **10** ein Stahlwerkstück **12**, das eine äußere Oberfläche **22** umfasst, welche die erste Seite **30** des Stapels **10** bereitstellt und darstellt, und ein Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** umfasst, das benachbart zu dem Stahlwerkstück **12** liegt und eine äußere Oberfläche **26** umfasst, welche eine entgegengesetzte zweite Seite **32** des Stapels **10** bereitstellt und darstellt. In anderen Fällen kann ein Werkstückstapel jedoch zwei Stahlwerkstücke (und ein Aluminiumlegierungs-Werkstück) oder zwei Aluminiumlegierungs-Werkstücke (und ein Stahlwerkstück) umfassen, solange das Aluminiumlegierungs-Werkstück eine Seite des Werkstückstapels **10** bereitstellt und darstellt und das Stahlwerkstück die entgegengesetzte andere Seite des Stapels **10** bereitstellt und darstellt. Wenn das Eindringmerkmal **50** in einem Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** umfasst ist, das Teil eines Stapels aus drei Werkstücken ist, und das Aluminiumlegierungs-Werkstück mit dem Eindringmerkmal **50** innerhalb des Stapels eingerichtet ist, sodass während des Punktschweißens eine Schweißelektrode mit diesem Werkstück einen Kontakt über dem Eindringmerkmal **50** herstellt, wie oben beschrieben, funktioniert das Eindringmerkmal **50** allgemein in der gleichen Weise und hat die gleiche allgemeine Wirkung auf die Schweißverbindung, die zwischen den benachbarten Stahl- und Aluminiumlegierungs-Werkstücken gebildet wird, wie zuvor beschrieben.

**[0055]** Wie in **Fig. 14** gezeigt, kann der Werkstückstapel **10** z. B. das Stahl- und das Aluminiumlegierungs-Werkstück **12, 14**, wie oben beschrieben, zusätzlich zu einem zweiten Stahlwerkstück **94** umfassen. Wie gezeigt überlappt hier das zweite Stahlwerkstück **94** die benachbarten Stahl- und Aluminiumlegierungs-Werkstücke **12, 14** und ist neben dem Stahlwerkstück **12** positioniert. Wenn das zweite Stahlwerkstück **94** so positioniert ist, stellt die äußere Oberfläche **26** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** die zweite Seite **32** des Werkstückstapels **14** bereit und dar, wie zuvor, während das Stahlwerkstück **12**, das benachbart zu dem Aluminiumlegierungs-Werkstück **14** liegt, nun ein Paar entgegengesetzter Stoßflächen **20, 96** umfasst. Die Stoßfläche **20** des Stahlwerkstückes **12**, die der benachbarten Stoßfläche **24** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** gegenüber und mit dieser in Kontakt steht, stellt die Stoßgrenzfläche **28** zwischen den beiden Werkstücken **12, 14** her. Die Stoßfläche **96** des Stahlwerkstückes **12**, die in die entgegengesetzte

Richtung weist, steht einer Stoßfläche **98** des zweiten Stahlwerkstückes **94** gegenüber und stellt einen überlappenden Kontakt mit dieser her. In dieser speziellen Anordnung von überlappten Werkstücken **12, 14, 94** stellt eine äußere Oberfläche **100** des zweiten Stahlwerkstückes **94** als solche nun die erste Seite **30** des Werkstückstapels **10** bereit und dar.

**[0056]** In einem anderen Beispiel, das in **Fig. 15** gezeigt ist, kann der Werkstückstapel **10** das Stahl- und das Aluminiumlegierungs-Werkstück **12, 14**, die oben beschrieben sind, zusätzlich zu einem zweiten Aluminiumlegierungs-Werkstück **102** umfassen. Wie gezeigt, ist das zweite Aluminiumlegierungs-Werkstück **102** hier in einer überlappenden Weise zwischen dem Stahl- und dem Aluminiumlegierungs-Werkstück **12, 14** angeordnet und umfasst somit ein Paar entgegengesetzter Stoßflächen **104, 106**. Und wenn das zweite Aluminiumlegierungs-Werkstück **102** so positioniert ist, stellt die äußere Oberfläche **22** des Stahlwerkstückes **12** noch immer die erste Seite **30** des Werkstückstapels **10** bereit und dar, und die äußere Oberfläche **26** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** stellt noch immer die zweite Seite **32** des Werkstückstapels **10** bereit und dar. In dieser Ausführungsform steht die Stoßfläche **106** des zweiten Aluminiumlegierungs-Werkstückes **102** allerdings der benachbarten Stoßfläche **20** des Stahlwerkstückes **12** gegenüber und mit dieser in Kontakt, um die Stoßgrenzfläche **28** an der Schweißstelle **16** herzustellen, wo die zwei Werkstücke **12, 102** durch eine Schweißverbindung zusammengefügt werden sollen. Die andere Stoßfläche **104** des zweiten Aluminiumlegierungs-Werkstückes **102** steht der Stoßfläche **24** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** gegenüber, welches die zweite Seite **32** des Werkstückstapels **10** bereitstellt und darstellt, und stellt einen überlappenden Kontakt mit dieser her.

**[0057]** Das Eindringmerkmal **50**, das innerhalb des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14**, welches die zweite Seite **32** des Werkstückstapels **10** bereitstellt und herstellt, enthalten ist, kann verwendet werden, um dabei zu helfen, die in jeder der **Fig. 14** und **Fig. 15** gezeigten Werkstückstapel **10** punktschweißen und die Festigkeit einer Schweißverbindung, die zwischen dem Stahlwerkstück **12** und dem benachbarten Aluminiumlegierungs-Werkstück **14, 102**, welche innerhalb der Stapel **10** enthalten sind, gebildet ist, in der gleichen allgemeinen Weise wie zuvor zu erhöhen. Insbesondere wird, nachdem der Stapel **10** zusammengebaut ist, die Schweißfläche **46** der ersten Schweißelektrode **40** gegen die erste Seite **30** des Werkstückstapels **10** gepresst, welche die äußere Oberfläche **22** des Stahlwerkstückes **12** (**Fig. 15**) oder die äußere Oberfläche **100** des zweiten Stahlwerkstückes **94** (**Fig. 14**) sein kann, und die Schweißfläche **48** der zweiten Schweißelektrode **44** wird gegen die zweite Seite **32** des Werkstückstapels **10** gepresst, welche die äußere

re Oberfläche **26** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** ist (**Fig. 14** und **Fig. 15**), das benachbart zu dem Stahlwerkstück **12** liegen kann oder nicht. Dann wird ein elektrischer Strom zwischen den axial und flächig ausgerichteten Schweißflächen **46, 48** der Schweißelektroden **40, 44** ausgetauscht, um eine Schweißverbindung zu bilden, welche die benachbarten Stahl- und Aluminiumlegierungs-Werkstücke **12** und **14, 102** aneinander bindet.

**[0058]** In jeder der in den **Fig. 14** und **Fig. 15** abgebildeten Ausführungsformen induziert das Vorhandensein des Eindringmerkmals **50** in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück **14**, welches die zweite Seite **32** des Werkstückstapels **10** bereitstellt und darstellt und somit durch die Schweißfläche **28** der zweiten Schweißelektrode **44** kontaktiert wird, das konische elektrische Stromflussmuster **54** innerhalb zumindest des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14, 102**, welches benachbart zu dem Stahlwerkstück **12** liegt. Das konische elektrische Stromflussmuster **54** hilft wiederum dabei, dass das innerhalb des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14, 102** durch den elektrischen Strom erzeugte Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung in einer wünschenswerteren Weise zu der Schweißverbindung erstarrt. Das Vorhandensein des Eindringmerkmals **50** in dem Aluminiumlegierungs-Werkstück **14**, welches durch die Schweißfläche **48** der zweiten Schweißelektrode **44** kontaktiert wird, begünstigt auch eine plastische Verformung innerhalb des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14** und das Sprengen und Aufbrechen einer (von) feuerfeste/n Oxidschicht/en an der Stoßgrenzfläche **28** der benachbarten Stahl- und Aluminiumlegierungs-Werkstücke **12** und **14, 102** und stellt in einigen Fällen ein/en offenen/s Raum oder Volumen bereit, welcher/s eine Bewegung des Schmelzbades aus geschmolzener Aluminiumlegierung während eines Stromflusses zulässt. Jede dieser Aktivitäten hilft dabei, die nachteiligen Auswirkungen zu minimieren, die oft das Ergebnis der feuerfeste/n Oxidschicht/en sind, welche auf der Stoßfläche **24, 106** des Aluminiumlegierungs-Werkstückes **14, 102** vorhanden ist/sind, die benachbart zu dem Stahlwerkstück **12** liegt.

**[0059]** Die obige Beschreibung bevorzugter beispielhafter Ausführungsformen und spezifischer Beispiele ist rein beschreibender Natur; diese sollen den Schutzzumfang der nachfolgenden Ansprüche nicht einschränken. Jeder der in den beigefügten Ansprüchen verwendeten Ausdrücke soll seine gebräuchliche und übliche Bedeutung haben, es sei denn, in der Patentbeschreibung wird ausdrücklich und unmissverständlich etwas anderes zum Ausdruck gebracht.

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**Zitierte Patentliteratur**

- US 6861609 [0035]
- US 8222560 [0035]
- US 8274010 [0035]
- US 8436269 [0035]
- US 8525066 [0035]
- US 8927894 [0035]

**Patentansprüche**

1. Verfahren zum Punktschweißen eines Werkstückstapels, der ein Stahlwerkstück und ein benachbartes Aluminiumlegierungs-Werkstück umfasst, wobei das Verfahren umfasst, dass:

ein Werkstückstapel vorgesehen wird, welcher eine erste Seite und eine entgegengesetzte zweite Seite aufweist, wobei der Werkstückstapel ein Aluminiumlegierungs-Werkstück mit einer äußeren Oberfläche, welche die zweite Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt, umfasst, und ferner ein Stahlwerkstück umfasst, welches entweder eine Stoßfläche des Aluminiumlegierungs-Werkstückes, welche die zweite Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt, oder eine Stoßfläche eines zweiten Aluminiumlegierungs-Werkstückes innerhalb des Werkstückstapels überlappt, damit in Kontakt steht und eine Stoßgrenzfläche herstellt, und wobei das Aluminiumlegierungs-Werkstück, welches die zweite Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt, ein Eindringmerkmal umfasst;

eine erste Schweißfläche einer ersten Schweißelektrode gegen die erste Seite des Werkstückstapels gepresst wird und eine zweite Schweißfläche einer zweiten Schweißelektrode gegen die äußere Oberfläche des Aluminiumlegierungs-Werkstückes gepresst wird, welches die zweite Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt, wobei die erste und die zweite Schweißfläche der ersten und der zweiten Schweißelektrode an einer Schweißstelle flächig ausgerichtet sind, und die zweite Schweißfläche der zweiten Schweißelektrode über dem Eindringmerkmal gegen die äußere Oberfläche des Aluminiumlegierungs-Werkstückes gepresst wird, welches die zweite Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt; und

ein elektrischer Strom zwischen die erste und die zweite Schweißelektrode und durch den Werkstückstapel an der Schweißstelle hindurch geleitet wird, um ein Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung zu erzeugen, welches eine benachbarte Stoßfläche des Stahlwerkstückes benetzt, und wobei das Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung zu einer Schweißverbindung erstarrt, welche das Stahlwerkstück entweder an das Aluminiumlegierungs-Werkstück, welches die zweite Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt, oder das zweite Aluminiumlegierungs-Werkstück innerhalb des Werkstückstapels bindet, welches davon auch immer die Stoßgrenzfläche mit dem Stahlwerkstück nach Aufhören des Leitens des elektrischen Stromes durch den Werkstückstapel herstellt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Stahlwerkstück eine äußere Oberfläche aufweist, welche die erste Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt, und wobei das Aluminiumlegierungs-Werkstück, welches die zweite Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt, ferner eine Stoßfläche

umfasst, welche die Stoßfläche des Stahlwerkstückes überlappt, damit in Kontakt steht und die Stoßgrenzfläche herstellt.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Aluminiumlegierungs-Werkstück, welches die zweite Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt, ferner eine Stoßfläche umfasst, welche die Stoßfläche des Stahlwerkstückes überlappt, damit in Kontakt steht und die Stoßgrenzfläche herstellt, und wobei der Werkstückstapel ferner ein zweites Stahlwerkstück umfasst, welches das Stahlwerkstück, das die Stoßgrenzfläche mit dem Aluminiumlegierungs-Werkstück herstellt, überlappt und neben diesem positioniert ist, wobei das zweite Stahlwerkstück eine äußere Oberfläche aufweist, welche die erste Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt.

4. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Werkstückstapel das Aluminiumlegierungs-Werkstück, welches die zweite Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt, und ein zweites Aluminiumlegierungs-Werkstück umfasst, wobei das zweite Aluminiumlegierungs-Werkstück eine Stoßfläche aufweist, welche die Stoßfläche des Stahlwerkstückes überlappt, damit in Kontakt steht und die Stoßfläche herstellt, und wobei das Stahlwerkstück ferner eine äußere Oberfläche aufweist, welche die erste Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt.

5. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Eindringmerkmal ein Durchgangsloch ist, welches sich vollständig durch das Aluminiumlegierungs-Werkstück hindurch erstreckt, welches die zweite Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt.

6. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Eindringmerkmal eine Vertiefung ist, welche die Dicke des Aluminiumlegierungs-Werkstückes, welches die zweite Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt, teilweise durchquert.

7. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Schritt zum Leiten von elektrischem Strom zwischen die erste und die zweite Schweißelektrode ferner umfasst, dass:

ein Schmelzbad aus geschmolzenem Stahl innerhalb des Stahlwerkstückes erzeugt wird, wobei das Schmelzbad aus geschmolzenem Stahl bewirkt, dass eine Dicke des Stahlwerkstückes um bis zu 50% an der Schweißstelle zunimmt, und wobei das Schmelzbad aus geschmolzenem Stahl nach Aufhören des Leitens des elektrischen Stromes durch den Werkstückstapel zu einer Stahlschweißlinse erstarrt.

8. Verfahren zum Punktschweißen eines Werkstückstapels, der ein Stahlwerkstück und ein benachbartes Aluminiumlegierungs-Werkstück umfasst, wobei das Verfahren umfasst, dass:

ein Werkstückstapel vorgesehen wird, welcher eine erste Seite und eine entgegengesetzte zweite Seite aufweist, wobei der Werkstückstapel ein Aluminiumlegierungs-Werkstück mit einer äußeren Oberfläche, welche die zweite Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt, umfasst, und ferner ein Stahlwerkstück umfasst, welches eine Stoßfläche aufweist, die eine Stoßfläche des Aluminiumlegierungs-Werkstückes überlappt und damit in Kontakt steht, um eine Stoßgrenzfläche zwischen den beiden Werkstücken herzustellen, und wobei das Aluminiumlegierungs-Werkstück, welches die zweite Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt, ein Eindringmerkmal umfasst;

eine erste Schweißfläche einer ersten Schweißelektrode gegen die erste Seite des Werkstückstapels gepresst wird und eine zweite Schweißfläche einer zweiten Schweißelektrode gegen die zweite Seite des Werkstückstapels gepresst wird, sodass die erste und die zweite Schweißfläche der ersten und der zweiten Schweißelektrode an einer Schweißstelle flächig ausgerichtet sind, wobei die zweite Schweißfläche der zweiten Schweißelektrode über dem Eindringmerkmal gegen die gegen die äußere Oberfläche des Aluminiumlegierungs-Werkstückes gepresst wird; und

ein elektrischer Strom zwischen die erste und die zweite Schweißelektrode und durch den Werkstückstapel an der Schweißstelle hindurch geleitet wird, um ein Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung innerhalb des Aluminiumlegierungs-Werkstückes zu erzeugen, welches die benachbarte Stoßfläche des Stahlwerkstückes an der zwischen den zwei Werkstücken hergestellten Stoßgrenzfläche benetzt, und wobei das Schmelzbad aus geschmolzener Aluminiumlegierung zu einer Schweißverbindung erstarrt, welche das Stahlwerkstück und das Aluminiumlegierungs-Werkstück nach Aufhören des Leitens des elektrischen Stromes durch den Werkstückstapel an der Stoßgrenzfläche aneinander bindet.

9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei das Stahlwerkstück eine äußere Oberfläche aufweist, welche die erste Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt, oder wobei der Werkstückstapel ferner ein zweites Stahlwerkstück umfasst, welches das Stahlwerkstück, das die Stoßgrenzfläche mit dem Aluminiumlegierungs-Werkstück herstellt, überlappt, mit diesem in Kontakt steht und neben diesem positioniert ist, wobei das zweite Stahlwerkstück eine äußere Oberfläche aufweist, welche die erste Seite des Werkstückstapels bereitstellt und darstellt.

10. Verfahren nach Anspruch 8, wobei der Schritt zum Leiten von elektrischem Strom zwischen die erste und die zweite Schweißelektrode ferner umfasst, dass:

ein Schmelzbad aus geschmolzenem Stahl innerhalb des Stahlwerkstückes erzeugt wird, wobei das Schmelzbad aus geschmolzenem Stahl bewirkt, dass eine Dicke des Stahlwerkstückes um bis zu 50% an der Schweißstelle zunimmt, und wobei das Schmelzbad aus geschmolzenem Stahl nach Aufhören des Leitens des elektrischen Stromes durch den Werkstückstapel zu einer Stahlschweißlinse erstarrt.

Es folgen 7 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

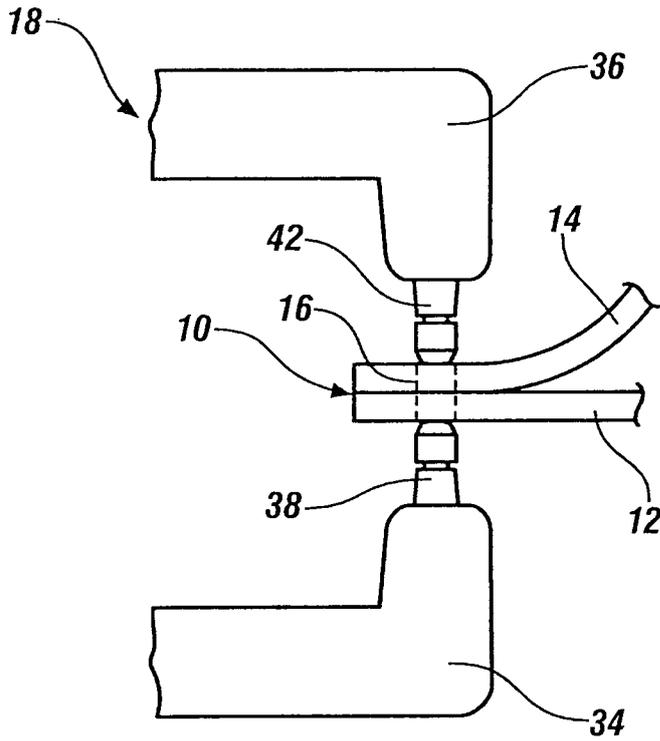


FIG. 1

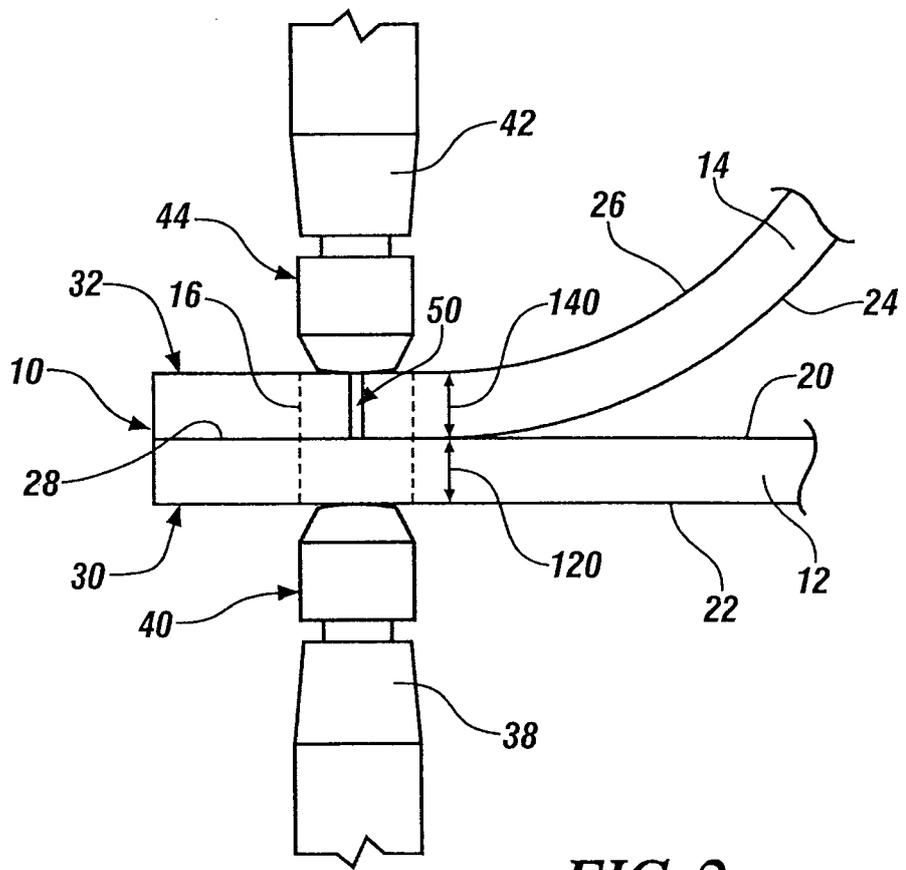
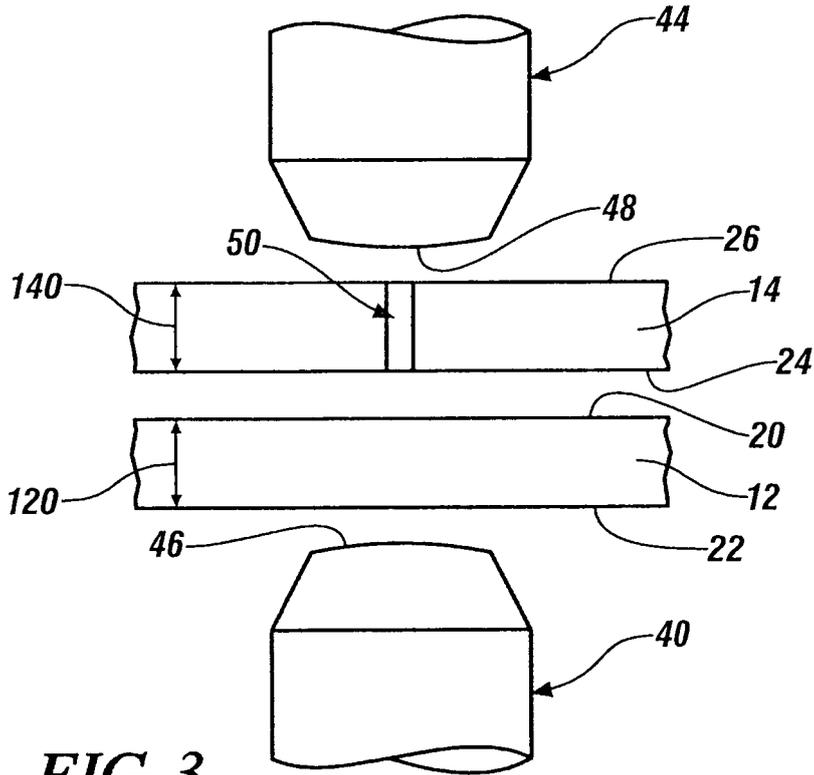
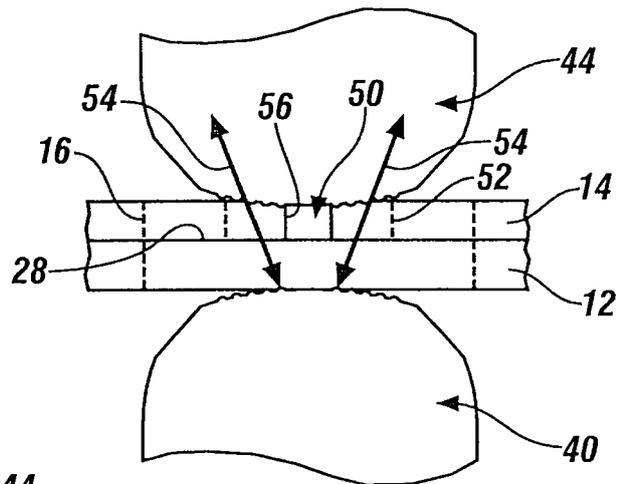


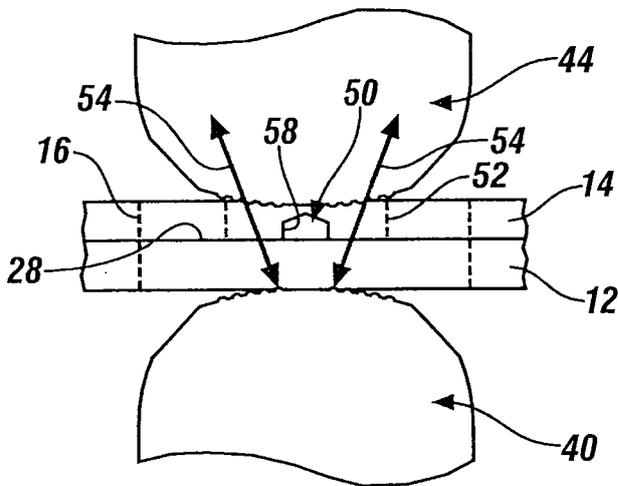
FIG. 2



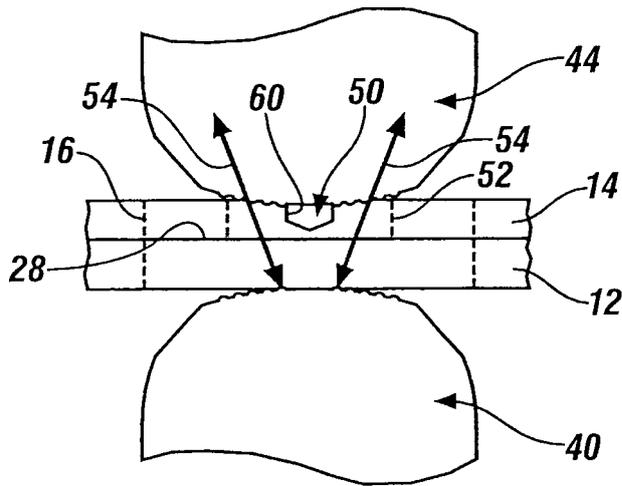
**FIG. 3**



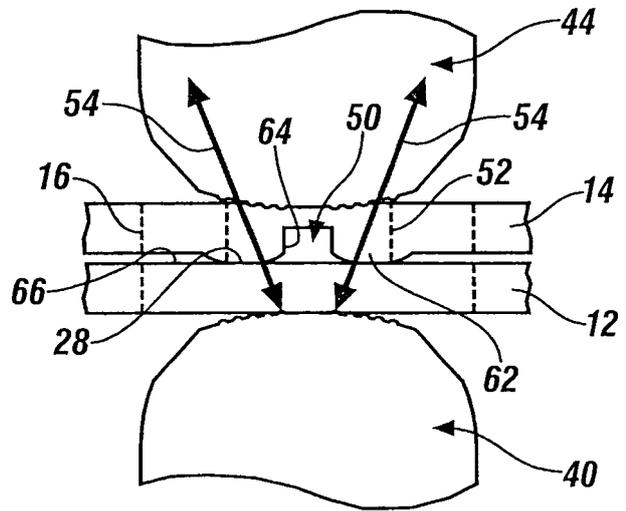
**FIG. 4**



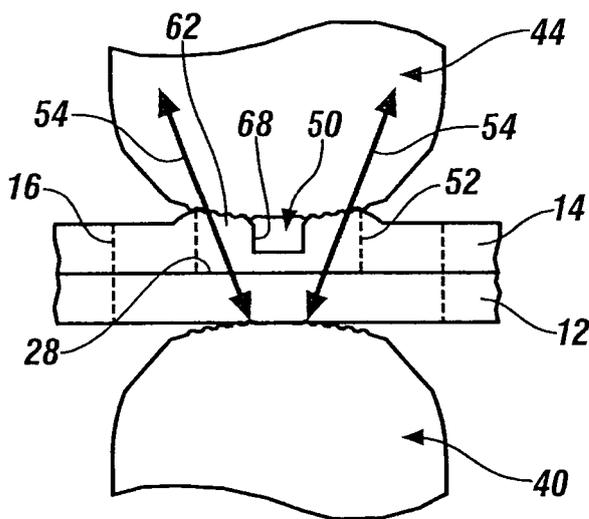
**FIG. 5**



**FIG. 6**

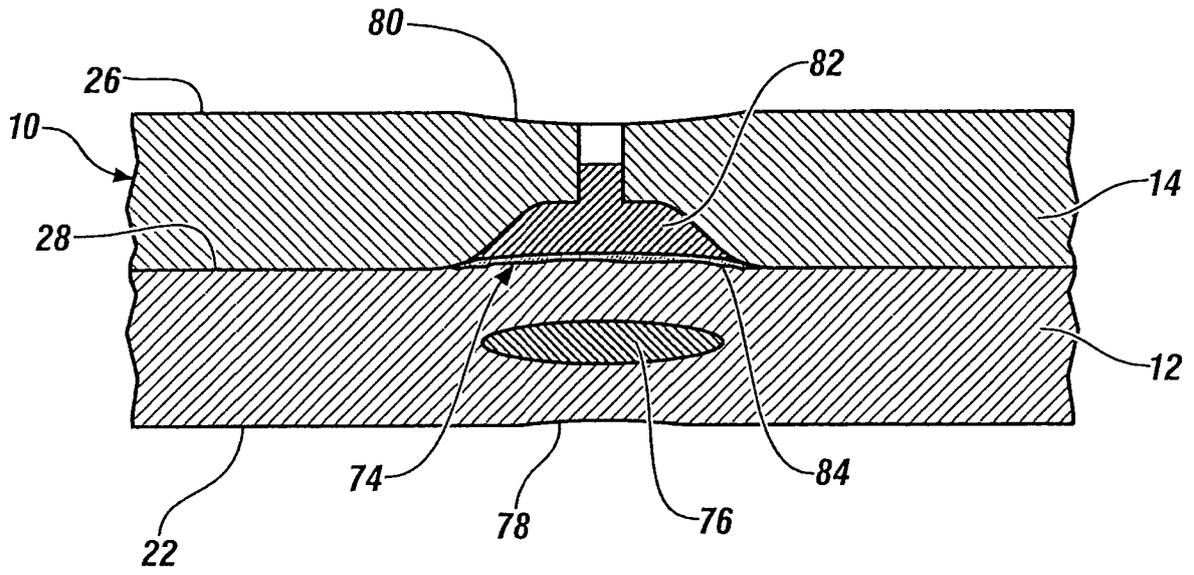


**FIG. 7**

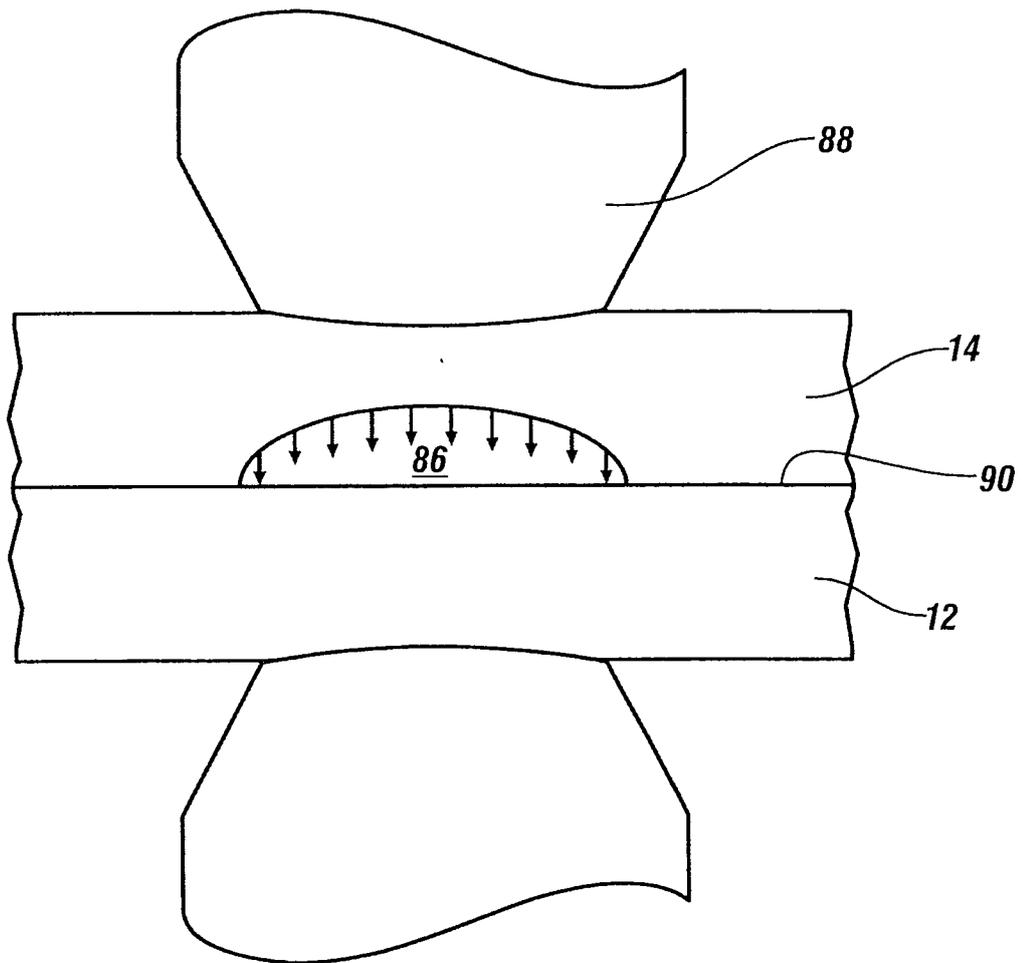


**FIG. 8**

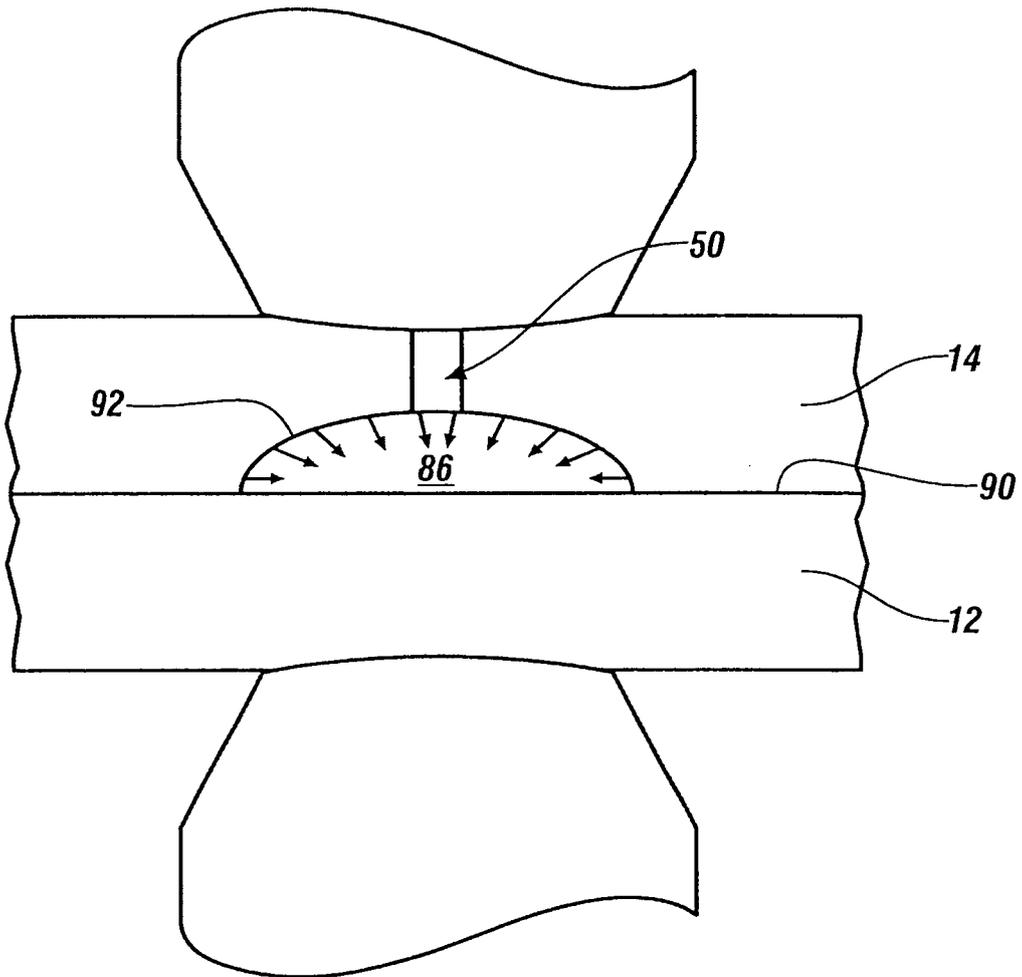




**FIG. 11**



**FIG. 12**



**FIG. 13**

