

Schweissen: Eigenspannungen, die beim Schweissen entstehen, lassen sich durch den Metallbauer kaum vermeiden. Es gibt jedoch Möglichkeiten, sie zu verringern. Hier die Ratschläge eines Fachmanns. Text und Bilder: Steffen Wagner

Beim Schmelzschweissen erfolgt der Wärme-eintrag ins Bauteil nicht gleichmässig, sondern örtlich begrenzt im Bereich der Fügestelle. Es werden lokal sehr hohe Temperaturen erreicht. Die dadurch entstehende Dehnung und Schrumpfung hängt nicht alleine von der Temperatur ab, sondern auch wie stark diese behindert werden.

Beim Schweissen sind Verformungen beziehungsweise Verzug eng mit den Eigenspannungen verbunden und lassen sich bei Schweisskonstruktionen nie vollständig verhindern. Sie treten bei normalen Schweissprozessen ohne Einwirkung von aussen auf.

Verschiedene Verzugsarten

Eigenspannungen sind allgemein Spannungen in einem Bauteil, auf das keine äusseren mechanischen Beanspruchungen einwirken und das einem konstanten Temperaturfeld unterliegt. Schweisseigenspannungen sind auf plastische Verformungen durch Behinderung zurückzuführen. Die mit den Eigenspannungen verbundenen inneren Kräfte und Momente sind im mechanischen Gleichgewicht.

Man unterscheidet bei schweisbedingten Abweichungen von der vorgesehenen Form eines Bauteils nach dem Abkühlen folgende Verzugsarten:

- Längsschrumpf (Verkürzung der Schweissnahtlänge und damit auch des Bauteils),
- Querschrumpf (Verkürzung des Bauteils quer zur Schweissnaht),
- Längs- und Querschrumpf (Verkürzung in beide Richtungen mit den damit verbundenen Verwerfungen),
- Winkelschrumpf (Winkelverzug).



Die beim Verzinken abgebauten Eigenspannungen des dünnwandigen Bauteils zeigen, wie gross die Verformungen durch die Schweissspannungen sein können. Foto: Schmidt

Les contraintes résiduelles de l'élément à paroi mince démonté lors de la galvanisation montrent l'ampleur potentielle des déformations occasionnées par les tensions de soudage. Photo: Schmidt

Vermeiden Sie Zugeigenspannungen

Eine Behinderung des Schweissverzuges kann durch steife Einspannung erfolgen, dies hat aber höhere Schweisseigenspannungen zur Folge.

Dünnwandige Bauteile haben das Risiko, nach dem Schweissprozess grosse Verformungen aufzuweisen. Dafür sind die auftretenden Eigenspannungen gering. Im Gegensatz dazu weisen dickwandige Bauteile nach dem Schweissen geringere Verformungen, aber grössere Eigenspannungen auf.

Die Bewertung von Eigenspannungen hängt in starkem Masse von den verwendeten Materialien ab. In spröden Werkstoffen können Überlagerungen aus mechanischen Spannungen und Eigenspannungen besonders hohe Spannungsspitzen hervorrufen, die aufgrund fehlenden plastischen Fließvermögens zum Bruch führen können. Bei duktilen Werkstoffen beeinflussen die Eigenspannungen den Beginn plastischer Formänderungen, jedoch sind die Auswirkungen auf das Bruchverhalten vernachlässigbar.

Zyklische Beanspruchungen führen zur Werkstoffermüdung. Zugeigenspannungen an der Oberfläche wirken sich dabei besonders negativ auf die Ermüdungsfestigkeit eines Bauteils beziehungsweise einer Schweissverbindung aus.

Messen Sie die Eigenspannungen

Eigenspannungen können zerstörungsfrei und zerstörend gemessen werden. Zerstörungsfreie Messungen, wie beispielsweise röntgenografische Untersuchungen oder Neutronenverfahren, ermitteln die Verzerrung des Metallgitters infolge der vorhandenen Eigenspannung. Während bei der röntgenografischen Eigenspannungsmessung allerdings nur oberflächennahe Messwerte ermittelt werden können, ist beim Neutronenverfahren

APPLICATION PRATIQUE

Moins de tension et de distorsion

Soudage : il est difficile d'éviter les contraintes résiduelles générées lors du soudage, mais il est possible de les diminuer. Voici les conseils d'un spécialiste.

Lors du soudage par fusion, l'apport de chaleur au niveau d'un élément n'est pas homogène mais limité aux raccords. Des températures très élevées peuvent être atteintes localement. L'allongement et le rétrécissement qui en résultent ne dépendent pas que de la température, mais aussi du niveau de modération correspondant. Lors du soudage, des déformations ou distor-

sions sont étroitement liées aux contraintes résiduelles et impossibles à éviter totalement au niveau de constructions soudées. Dans le cadre d'opérations de soudage normales, elles surviennent sans aucune influence de l'extérieur.

Différents types de distorsions

Les contraintes résiduelles sont généra-

lement des tensions au niveau d'un élément qui n'est sujet à aucune sollicitation mécanique extérieure et qui est soumis à un champ thermique constant. Les contraintes résiduelles résultent de déformations plastiques suite à une perturbation. Les forces et les moments internes liés aux contraintes résiduelles sont en équilibre mécanique. En cas d'écarts par rapport

à la forme prévue d'un élément après le refroidissement, on distingue les types de distorsions suivants :

- rétrécissement longitudinal (raccourcissement de la longueur des cordons et donc de l'élément),
- rétrécissement transversal (raccourcissement transversal de l'élément par rapport au cordon),
- rétrécissement longitudinal et trans-

eine etwa dreifach höhere Eindringtiefe möglich. Bei der zerstörenden Messung wird die elastische Rückfederung aufgrund des gestörten Gleichgewichtes erfasst und ausgewertet. Angewendete Verfahren sind die Bohrlochmethode, die Ringkernmethode oder auch das Sägeschnittverfahren. Die Messungen können somit auch in grösseren Eindringtiefen erfolgen.

Wärmen Sie das Bauteil vor
Schweisseigenstressungen lassen sich kaum ganz verhindern, können jedoch mittels technologischer Massnahmen abgebaut werden. Die wohl gängigste Methode in der Praxis ist das Vorwärmen des Bauteiles. Dadurch werden Härtespitzen vermieden, Spannungsspitzen in dickwandigen Bauteilen vermindert sowie die Abkühlgeschwindigkeit reduziert. Empfehlens-

wert ist das gleichmässige Vorwärmen der zu verbindenden Teile.

Für den mittelständischen Metallhandwerker schwer auszuführen, soll hier trotzdem das Spannungsarmglühen erwähnt werden. Durch das fachgerecht ausgeführte Spannungsarmglühen – gleichmässige, langsame Erwärmung und Abkühlung bei Glühtemperaturen zwischen 550 und 650 Grad Celsius für unlegierte Stähle – >

versal (raccourcissement dans les deux sens occasionnant des gauchissements),
- rétrécissement angulaire (distorsion angulaire).

Évitez les contraintes résiduelles

Il est possible d'éviter les distorsions en assurant un encastrement solide, mais cela entraîne d'importantes contraintes résiduelles. Les éléments à paroi mince sont sujets à des déformations importantes après l'opération de soudage. Les contraintes résiduelles correspondantes sont très faibles. Les éléments à paroi

épaisse présentent en revanche des déformations moindres après le soudage, mais des contraintes résiduelles plus importantes. L'évaluation des contraintes résiduelles dépend en grande partie des matériaux utilisés. Avec des matériaux cassants, des superpositions résultant des tensions mécaniques et des contraintes résiduelles peuvent générer des pics de tension particulièrement élevés, susceptibles d'entraîner une rupture suite à un manque de fluidité plastique. Avec des matériaux ductiles, les contraintes résiduelles influencent le début des défor-

mations plastiques, mais les conséquences sur le comportement à la rupture sont négligeables. Des sollicitations cycliques entraînent une fatigue du matériau. Les contraintes résiduelles au niveau de la surface influent négativement sur la résistance à la fatigue d'un élément ou d'une soudure.

Mesurez les contraintes résiduelles

Les mesures des contraintes résiduelles peuvent être destructives ou non. Les mesures non destructives telles que les radiographies ou les procédés aux neutrons calculent la déformation du

treillage métallique suite à la contrainte résiduelle. Tandis qu'une mesure radiographique ne permet de déterminer que des valeurs proches de la surface, le procédé aux neutrons permet une profondeur de pénétration 3 fois plus élevée. Pour la mesure destructive, le retour élastique résultant de la perturbation de l'équilibre est enregistré et évalué. Processus utilisés : technique de forure, toroïdale ou de sciage. Les mesures peuvent ainsi être effectuées à des profondeurs de pénétration plus élevées.

>

PRAXISANWENDUNG

> werden die Scheweisseigenspannungen vermindert. Dieses kann für das ganze Bauteil oder auch nur örtlich geschehen.

Setzen Sie nur qualifiziertes Personal ein

Weitere Möglichkeiten bieten mechanische Verfahren. Dabei werden gezielt Druckspannungen eingebracht, welche den negativen Scheweisseigenspannungen entgegenwirken. Entweder geschieht dies über örtliche Druckaufbringung oder mittels Kugelstrahlen beziehungsweise Hämmern der Schweissnaht. Bei all diesen Verfahren ist der Einsatz von qualifiziertem Personal notwendig.

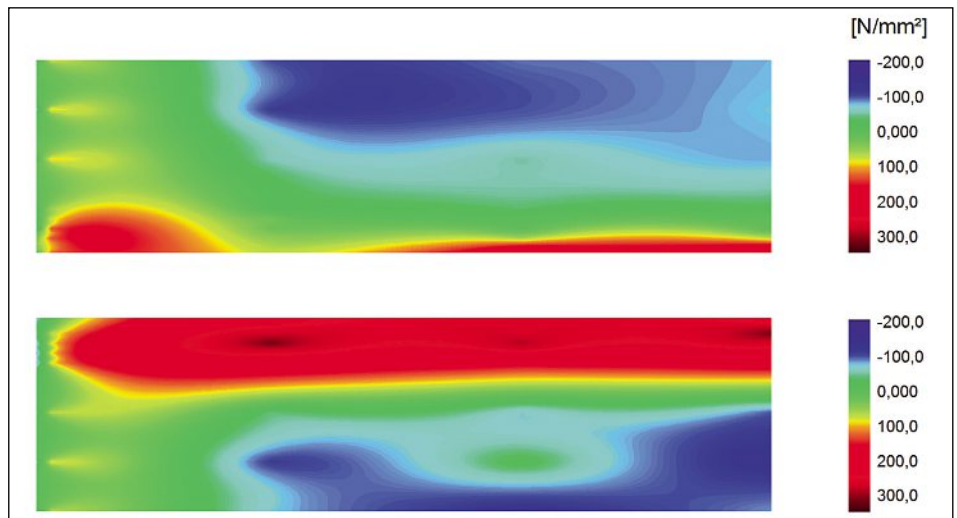
Der Schweissfolgeplan ergänzt den Schweissplan und die Werkstatt- beziehungsweise Konstruktionszeichnung. Er ist besonders bei kompliziert auszuführenden oder verzugsanfälligen Konstruktionen aufzustellen.

Durch die Angabe von Schweissnahtaufbau, Nahtfolge und Schweissrichtung können schon im Vorfeld die während des Schweissprozesses auftretenden Eigenspannungen minimiert und eine wirtschaftliche Fertigung gewährleistet werden.

Fazit: Schweißen Sie nicht einfach drauf los. Wer sich vor dem Schweißen Gedanken über den örtlichen Wärmeeintrag und die anschließende Abkühlung mit den damit verbundenen Eigenspannungen und Formänderungen macht, hat die Toleranzen im Griff. Nicht zuletzt ist die Masshaltigkeit einer Schweisskonstruktion ein Merkmal für die Qualität und kann sich erheblich auf die Kosten auswirken. ■

Erstveröffentlichung: M&T metallhandwerk

Autor: Dipl.-Ing. (IWE) Steffen Wagner ist Mitarbeiter der Schweisstechischen Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) Halle in der Abteilung Werkstofftechnik.



Die röntgenografische Messung zeigt, wie gross die Oberflächen-eigenspannungen an zwei geschweißten (Stumpfnäht) Blechen mit einer Dicke von zwanzig Millimetern sein können. Foto: SLV Halle

La mesure radiographique montre l'ampleur potentielle des contraintes résiduelles de surface au niveau de deux tôles de 20 mm d'épaisseur soudées bord à bord. Photo: SLV Halle

Schweißen Sie schonend

Folgende Grundregeln helfen bei der Schweissplanung und -ausführung:

- Der durch das Schweißen entstehende lokale Wärmeeintrag ins Bauteil sollte so gering wie möglich gehalten werden (Verringerung der Streckenenergie),
- kleinere Teilstücke zuerst miteinander verschweißen,
- Schweissnähte sind in der Nähe der neutralen Achse des Bauteiles anzuordnen,
- das Bauteil sollte möglichst lange ungehindert schrumpfen können, deswegen sind Nähte, die das Bauteil am meisten versteifen, möglichst zum Schluss auszuführen,
- symmetrisch vom Schwerpunkt des Bauteiles beginnend nach aussen schweißen,
- zuerst kurze, dann lange (durchlaufende) Nähte schweißen,
- erst Längsnähte, dann Rundnähte schweißen,
- Kreuzstösse sollten aufgrund des mehrachsigen Spannungszustandes vermieden werden,
- kreuzen sich Stumpf- und Kehlnähte, sind zuerst die Stumpfnähte und dann die Kehlnähte zu schweißen,
- erst Nähte mit Zugbeanspruchung, dann Nähte im Druck- und Schubbereich schweißen,
- Pilgerschrittschweissung bei grossen Nahtlängen an ebenen Blechen anwenden.

APPLICATION PRATIQUE

> Préchauffez l'élément

Les contraintes résiduelles sont difficiles à éviter totalement, mais peuvent être réduites par le biais de mesures spécifiques. La technique la plus courante est de préchauffer l'élément. Cela permet d'éviter toute dureté et de réduire les pics de tension au niveau d'éléments à paroi épaisse ainsi que la vitesse de refroidissement. Il est recommandé d'assurer un préchauffage homogène des éléments à assembler. Difficile à mettre en œuvre pour les PME, le revenu de détente doit néanmoins être évoqué ici. S'il est exécuté dans les règles de l'art, un réchauffement lent et régulier et un refroidissement à une température de recuit située entre 550 et 650°C pour les aciers non alliés réduisent les contraintes résiduelles. Cela peut survenir au niveau de l'ensemble de l'élément ou juste localement.

Ne faites appel qu'à du personnel compétent

D'autres possibilités résident dans un processus mécanique : des tensions de compression sont mises en œuvre contre les contraintes résiduelles négatives par un apport local de pression, un grenailage ou un martelage du cordon de soudure. Toutes ces interventions doivent être effectuées par du personnel compétent. Le plan de sou-

dure complémentaire, qui complète le plan de soudure et le plan d'exécution ou de construction, intervient notamment pour des constructions complexes ou sujettes aux distorsions. Les consignes liées à un cordon de soudure, au tracé d'un cordon et au sens de soudage permettent déjà de minimiser au préalable les contraintes résiduelles survenant lors du soudage et de garantir une finition économique.

Conclusion : réfléchissez avant de souder !

Réfléchir à l'apport local de chaleur et au refroidissement avec les contraintes résiduelles et les déformations correspondantes permet d'avoir les tolérances bien en main. La stabilité dimensionnelle d'une construction soudée est un critère de qualité et peut avoir des répercussions majeures sur les coûts. ■

Soudez avec précaution

Les règles de base suivantes aident à planifier et à exécuter le soudage :

- maintenir l'apport de chaleur local aussi bas que possible (réduction de l'énergie de l'arc),
- souder d'abord les petits segments,
- les cordons doivent être soudés à proximité de l'axe neutre de l'élément,
- l'élément doit pouvoir se rétrécir librement ; les cordons rigidifiant le plus

l'élément doivent donc être soudés à la fin,

- souder symétriquement par rapport au centre de gravité de l'élément en commençant à l'extérieur,
- souder d'abord les cordons courts, puis les longs (continus),
- souder d'abord les cordons longitudinaux, puis les circulaires,
- éviter les joints en croix en raison de l'état de contrainte multiaxial,

- si des soudures bord à bord et des soudures d'angle se croisent, réaliser tout d'abord les soudures bord à bord, puis les soudures d'angle,
- souder tout d'abord les cordons soumis à un effort de traction, puis ceux soumis à la pression et à des poussées,
- utiliser le soudage à pas de pèlerin pour les cordons longs au niveau de tôles plates.