MAG-Schweißen hochfester Feinkornbaustähle

Dipl.-Ing. (FH) Peter Gerster, Ehingen/Donau

1 Einleitung

Hoch- und höherfeste Stähle wie die wasservergüteten Feinkornbaustähle mit Streckgrenzen, mittlerweile bis zu 1300 N/mm², verfügen dank moderner Stahl- und Walzwerktechnik über hervorragende Zähigkeitswerte, ein günstiges Verhalten beim Kaltumformen und eine gute Schweißeignung. In diesem Bericht werden Voraussetzungen für den Einsatz der hoch- und höherfesten Feinkornbaustähle, spezifische Verarbeitungsregeln wie Vorwärmung, Schweißen und Schweißzusätze, sowie Vermeidung der Wasserstoffversprödung, behandelt.

2 Entwicklung hochfester Feinkornbaustähle

Ständig steigende Anforderungen wie Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Zähigkeit, bis hin zu höchsten Festigkeitswerten bei guter Schweißeignung, trieben die Entwicklung der Feinkornstähle immer weiter voran.

Durch den Einsatz optimierter Sekundärmetallurgie, sowie der Vakuumentgasungstechnik, konnten die Gehalte unerwünschter Begleitelemente wie z. B. Schwefel, Phosphor, Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff soweit reduziert werden, dass sich immer optimalere Werkstoffwerte einstellen ließen. Beispielsweise können heute Stähle mit definierten Schwefel- und Stickstoffgehalten von nur wenigen ppm hergestellt werden.

Heute wird bereits der wasservergütete Feinkornstahl mit einer Streckgrenze von 1300 N/mm² (S1300QL) im Autokran verwendet. Durch die Weiterentwicklung der thermomechanischen Walztechnik in Verbindung mit einer nachfolgenden Intensivkühlung und anschließender Anlassbehandlung bewegen sich neueste Entwicklungen bei TM-Stählen bis hin zu Streckgrenzen von 1100 N/mm², Bild 1. Alle diese Stähle sind hochzäh und unter Beachtung von einschlägigen Verarbeitungsregeln gut schweißbar.



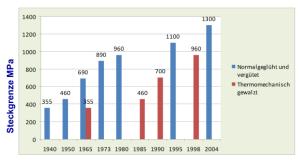


Bild 1: Stahlentwicklung

2.1 Methoden der Festigkeitssteigerung

Bei den ersten Stählen mit höherer Festigkeit wurde dies primär über chemische Zusammensetzung durch festigkeitssteigernde Elemente, vor allem Kohlenstoff und Mangan erreicht. Aluminium bindet den gelösten Stickstoff und trägt so zur Verbesserung der Alterungsbeständigkeit bei. Durch die dabei entstehenden Al-Nitride wird das Kornwachstum behindert, so dass das Gefüge feinkörniger wird. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass aus diesem Grund auch das Schweißen in kaltumgeformten Bereichen ohne Beeinträchtigung der Zähigkeit möglich ist (entgegen DIN 18800).

Bei steigenden Festigkeiten ist die reine Mischkristallbildung bei C/Mn-Stählen nicht mehr einsetzbar, da die Grenzen der Schweißbarkeit schnell erreicht werden. In der weiteren Entwicklung wurden also andere festigkeitsssteigernde Maßnahmen wie Kornfeinung, Teilchenausscheidung oder Versetzungsanhäufung einzeln oder in Kombination eingesetzt [1].

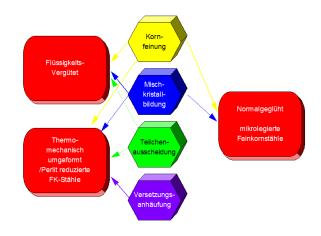


Bild 2: Methoden der Festigkeitssteigerung

Die Herstellung der wasservergüteten Feinkornbaustähle ist Energie intensiv (Erwärmen nach dem Walzen auf Austenittemperatur, Abschrecken/Härten, Anlassen bei höheren Temperaturen), dementsprechend sind diese Stähle teuer. Von den Stahlverarbeitern kam deshalb die Forderung, Feinkornbaustähle zu entwickeln, die neben einer hohen Streckgrenze ein feinkörniges Gefüge, eine gute Zähigkeit besitzen, gut schweißbar und auch kostengünstiger sind. Daraufhin erfolgte Anfang der 90 er Jahre die Entwicklung der höherfesten thermomechanisch gewalzten Stähle (TM-Stähle).

Bei den thermomechanisch gewalzten Stählen (auch perlitarme Stähle, "PAS" genannt) wird das feinkörnige Gefüge direkt beim Walzen ohne weitere Wärmenachbehandlung erzeugt. Beim konventionellen Walzen wird nach jedem Walzvorgang das Gefüge "zerstört" - es entstehen viele neue, flache Körner. Es beginnt die Rekristallisation und somit die Bildung eines grobkörnigen Gefüges mit geringerer Festigkeit (Bild 3).

Beim thermomechanischen Walzen wird ab einer bestimmten Blechdicke die Walztemperatur abgesenkt und somit die Rekristallisation unterbunden. Dadurch wird erreicht, dass am Ende der einzelnen Walzvorgänge ein feinkörniges Gefüge vorliegt. Beim Walzen im niedrigeren Temperaturbereich entstehen höhere Umformkräfte, dadurch werden die Walzgerüste höher beansprucht. statt.

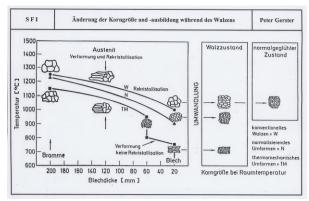


Bild 3: Thermomechanisches Walzen

Die Herstellung dieser Stähle beruht auf einer Kombination zwischen Umformvorgängen mit einer genauen Temperaturführung im Austenitgebiet. Diese Umformvorgänge finden in Form von mechanischen Walzprozessen vor, während, oder nach der γ - α Phasenumwandlung.

Die Festigkeits- bzw. Zähigkeitseigenschaften werden durch eine Überlagerung der Feinkornbildung und der Ausscheidungshärtung erreicht.

Festigkeit der TM-Stähle

Thermomechanisch gewalzte Stähle gibt es im Streckgrenzenbereich 260 bis 890 N/mm². Ultrahochfeste Sorten bis zu 1100 N/mm² sind von bestimmten Stahlwerken bereits erhältlich.

Wirkung der Legierungselemente:

Grundsätzlich haben thermomechanisch gewalzte Stähle einen sehr niedrigen C-Gehalt. Entscheidend für die Entwicklung der thermomechanisch gewalzten Stähle, (auch perlitarme und perlitfreie Sonderbaustähle genannt) ist die Kenntnis der positiven Wirkung von Mikrolegierungen im Stahl. Eine Kombination der Legierungselemente:

- · Vanadium (V)
- · Niob (Nb) und
- Titan (Ti)

haben dabei eine besondere Bedeutung. Die Legierungselemente V, Nb und Ti verändern die Eigenschaften des Stahles durch Ausscheidunghärtung und Kornverfeinerung.

Die Intensivkühlung mit Anlassbehandlung wird bei TM-Stählen bei höheren Festigkeiten ab Rp 0,2 > 700 N/mm² angewandt.

Vorteile

- Je nach Blechdicke und Herstellverfahren deutlich geringerer Preis
- Bessere Ebenheit
- Bessere Schweißbarkeit aufgrund geringerem CET (Kohlenstoffäquivalent) und damit keine oder geringere Vorwärmung erforderlich
- Geringere Abkantradien möglich

Nachteile

- Blechdicken eingeschränkt*
- Höhere Eigenspannungen
- Wärmebehandlung mit höheren Temperaturen oder Warmumformung nicht möglich
- Etwas geringere Zähigkeit

Warmbreitband bis max.10 mm, Grobbleche intensivgekühlt und angelassen bis 25 mm Dicke

Tabelle 1: Vor- und Nachteile TM-Stahles zu Vergütungsstahl

In Tabelle 1 werden die Vor- und Nachteile von TM-Stählen gegenübergestellt. Aufgrund der Vorteile des TM-gewalzten Stahles wird sich dieser Werkstoff zukünftig vermehrt im Streckgrenzenbereich von 355 bis 700 N/mm² durchsetzen.

Im ultrahochfesten Bereich werden fast ausschließlich wasservergütete Feinkornstähle eingesetzt. Hierbei wird im vor allem im Mobilkranbereich aus Gewichtsgründen immer mehr der S1100QL und teilweise sogar der S1300QL verwendet. Bei diesen Stahltypen ist es jedoch besonders wichtig zur Erreichung der entsprechenden mechanisch-technologischen Eigenschaften die richtige Wärmeeinbringung zu wählen.

3 Wirtschaftliche Kriterien für den Einsatz höherfester Stähle in Stahlkonstruktionen

Aufgrund des hohen Kosten- und Wettbewerbsdruckes sind besonders die Hersteller schweißintensiver Produkte gezwungen, ständig ihre Fertigungsprozesse zu optimieren und die Produktion leistungsfähiger zu gestalten. Der Schlüssel dazu ist die Umsetzung neuer Technologien und damit die Erhöhung der Produktivität, beispielsweise durch den Einsatz neuer Werkstoffe. Dabei sind bei Stahlbaukonstruktionen hochfeste Stähle unverzichtbar und werden sich auch in Zukunft vermehrt durchsetzen. Dies gilt auch für den bauaufsichtlichen Bereich [3], wo bisher, neben den normalen Baustählen, nur normalisierend gewalzte Stähle mit 460 N/mm² Streckgrenze und vergütete Stähle mit 690 N/mm² Streckgrenze zugelassen sind. Im Wesentlichen sind folgende Kriterien für den Einsatz hochfester Werkstoffe ausschlaggebend:

3.1 Erhöhung des Leistungsgewichtes Nutzlast / Eigengewicht

Durch den Einsatz höherer Streckgrenzen können insbesondere im Fahrzeugbau Energiekosten (Treibstoff) durch geringeres Eigengewicht eingespart werden. Im Mobilkransektor kann durch den Einsatz sogenannter Taxikrane, welche die Ausrüstung und das benötigte Gegengewicht am Fahrzeug transportieren, auf ein Begleitfahrzeug verzichtet werden. Außerdem werden Transportwege reduziert, da höhere Nutzlasten/Fahrzeug bewegt werden. Andererseits können höhere Nutzlasten bei gleichem Eigengewicht realisiert werden, was sich positiv auf die Wettbewerbsfähigkeit auswirkt.

3.2 Verringerung der Material- und Fertigungskosten

Die Verwendung höherfester Werkstoffe führt zu einer der Streckgrenze proportionalen Verringerung der Blechdicke. Bild 4 zeigt beispielhaft die mögliche Kostenreduktion.

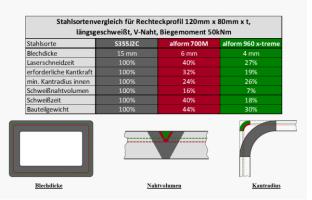


Bild 4: Kostenreduktion durch Leichtbau

Obwohl z.B. ein Stahl mit 960 N/mm² Streckgrenze im Einkauf ca. das Doppelte pro Tonne im Vergleich mit S355J2C kostet, fallen aufgrund des geringeren Gewichtes geringere Materialkosten an. Ein Vielfaches geringer ist dabei auch das einzubringende Schweißgut und die Laserschneidzeit wird deutlich verkürzt. Somit werden die anfallenden Lohnkosten deutlich reduziert.

Aufgrund des konstanten E-Moduls ist die elastische Durchbiegung der Konstruktion oft aus funktionsbedingten und / oder psychologischen Gründen (Kranausleger, Fahrwerke) begrenzt. So sind die Konstrukteure gefordert die nötige Steifigkeit über die Bauteilgestaltung zu realisieren. Die dabei erhöhten Kosten, z.B. durch mehr Versteifungsrippen müssen bei einer Wirtschaftlichkeitsrechnung gegen gerechnet werden.

Trotzdem sind aufgrund der höheren Leistungs- und Kostenvorteile höchstfeste Feinkornbaustähle nicht mehr wegzudenken. Die Herstellung moderner Mobil- und Raupenkrane mit Nutzlasten bis zu 3000 t und mehr ist ohne diese Werkstoffe nicht möglich.

4 Schweißzusätze nach DIN EN ISO Normen

Da von den Schweißzusätzen bzw. der Schweißverbinder Regel die gleichen mechanischtechnologischen Eigenschaften erwartet werden, wie beim Grundwerkstoff, müssen diese entsprechend der Festigkeitsklasse legiert sein. Bei Wurzellagen und einlagigen Kehlnähten findet eine Auflegierung des Schweißgutes durch den Grundwerkstoff statt. Streckgrenze und Zugfestigkeit werden dadurch im Vergleich zum "reinen" Schweißgut erhöht. Zum Heften hochfester Grundwerkstoffe werden erfahrungsgemäß Schweißzusätze mit geringerer Festigkeit verwendet. Die Anwendung "weicher" Schweißzusätze wirkt sich hinsichtlich der Kaltrisssicherheit vorteilhaft aus, sodass mit einer abgesenkten Vorwärmtemperatur bzw. je nach Randbedingungen häufig auch ohne Vorwärmung gearbeitet werden kann. Aufgrund der wesentlich höheren Bruchdehnung ist deshalb auch die Rissgefahr zusätzlich herabaesetzt.

Man verwendet deshalb, vor allem bei hochfesten Stählen, für Wurzellagen und einlagige Kehlnähte üblicherweise niedriger legierte Schweißzusätze als für Füll- und Decklagen. Zum Beispiel kann für Wurzelschweißungen bei mehrlagigen Schweißnähten für die Festigkeitsbereiche S690 und höher bei Blechdicken ≥ 14 mm der Zusatzwerkstoff G4Si1 nach DIN EN ISO 14341-A eingesetzt werden.

	GAS	LBH	UP	WIG	MAG / MIG	MSG / FD
unleg. und Feinkorn- stähle	EN 12536	DIN EN ISO 2560	DIN EN ISO 14171	DIN EN ISO 636	DIN EN ISO 14341	DIN EN ISO 17632
hochfeste Re > 500 N/mm²		DIN EN ISO 18275	DIN EN ISO 26304	DIN EN ISO 16834		DIN EN ISO 18276
Schutzga- se / Pulver			DIN EN ISO 14174	DIN EN ISO 14175		
Lieferbe- dingungen		DIN EN ISO 544 DIN EN 12074				

Tabelle 2: DIN EN ISO Normen Schweißzusätzen

Mittlerweile wurden alle relevanten EN Normen für diese Schweißzusätze durch ISO Normen ersetzt. Tabelle 2 zeigt einen Überblick über die neuen DIN EN ISO – Normen für Feinkornstähle in Abhängigkeit vom Schweißverfahren. Lediglich die Norm für das Gasschweißen wurde noch nicht überarbeitet, da für die Feinkornstähle dieses Verfahren ohnehin nicht angewendet wird.

5 Schutzgase

Das Schutzgas dient zunächst dazu, die Umgebungsluft von der Schmelze fernzuhalten. Um dieses zu gewährleisten, muss die richtige Gasmenge eingestellt werden. Falsche Gasmengeneinstellung kann zu Unregelmäßigkeiten führen (siehe Merkblatt DVS 0912-2). Die Gasmenge sollte daher in jedem Fall am Brenner mit einem Schwebekörpermessgerät überprüft werden.

Überwiegend werden beim MAG-Schweißen von Feinkornbaustählen Schutzgase der Gruppe M2 nach DIN EN ISO 14175, vorzugsweise der Gruppen M21 (z. B. Argon mit 18% CO2), M20 (Ar mit 8% CO2) oder auch Mehrkomponentengase der Gruppe M23 (Argon mit 5% 02 und 5% CO2) und der Gruppe M24 (Argon mit 5% 02 und 15% CO2) eingesetzt. Für basische und Metallpulver-Fülldrahtelektroden werden bevorzugt Mischgase der Gruppe M21 eingesetzt. Es gibt aber auch Fülldrähte, die speziell für das Schweißen unter CO2 geeignet sind.

Der Einfluss der Schutzgase auf die chemische Zusammensetzung des Schweißgutes und auf die mechanischtechnologischen Eigenschaften der Schweißverbindung ist zu beachten. Die aktiven Komponenten Sauerstoff und Kohlendioxid führen zu einem Abbrand von Legierungselementen und den damit verbundenen Änderungen von Festigkeit und Zähigkeit. Dies gilt besonders für Stähle höherer Festigkeit und für Schweißverbindungen, die bei tieferen Temperaturen eingesetzt werden. Bei stärker oxidierenden Schutzgasen (z. B. Gruppe C1 und M3) ist der Einfluss der Lichtbogenlänge auf den Abbrand von Legierungselementen größer als bei schwächer oxidierenden Schutzgasen. Grundsätzlich sind alle Schutzgase nach DIN EN ISO 14175 für die MAG -Schweißung geeignet, wobei die Gase der Gruppe M 1 nur in Ausnahmefällen zur Anwendung gelangen. In der Regel wird Argon reiches Mischgas mit ca. 18 -20% CO2 eingesetzt. Der Einfluss der Schutzgase auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften ist zu berücksichtigen. Dies gilt umso mehr, je höher die Festigkeit und je tiefer die Einsatztemperatur ist.

5 Schweißtechnische Voraussetzungen

Beim Schweißen von Feinkornbaustählen sind unbedingt an jedem Arbeitsplatz Möglichkeiten für das Vorwärmen zu schaffen. In der **DIN EN ISO 13916** vom Nov.1996 [3] sind die verschiedenen Definitionen sowie Temperaturmesspunkte beschrieben. Hierbei wird zwischen Vorwärmtemperatur T_p , Zwischenlagentemperatur T_i und Haltetemperatur T_h unterschieden.

Die Kontrolle der Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur kann mit Temperaturmessstiften(TS), Kontaktthermometer(CT), digitalen Temperaturmessgeräten(TE) oder berührungslos messende optische oder elektrische Geräte (TB) erfolgen. Die Lage der Messpunkte ist in Bild 5 dargestellt.

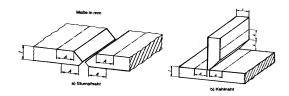


Bild 5: Lage der Messpunkte: $t \le 50$: A = 4x t, max.50 mm t > 50: A = 75 mm

Nach **DIN EN 1011-2** gilt jedoch bei allen Dicken mindestens A= 75 mm von der Nahtmitte.

Vor Beginn der Schweißarbeiten ist der Nahtbereich zu säubern. Schneidschlacke, Zunder und Rost sind dabei durch Bürsten, Schleifen oder am besten durch Strahlen zu entfernen. Durch Trocknen oder Vorwärmen ist außerdem sicherzustellen, dass der Nahtbereich feuchtigkeitsfrei ist.

6 Vermeidung von Kaltrissen

Ein wirksames Mittel ist das Vorwärmen. Es verzögert die Abkühlung des Nahtbereiches und begünstigt die Wasserstoffeffusion. Das Kaltrissverhalten von Stählen hat wesentlichen Einfluss auf die Schweißkosten. Es besteht deshalb großes Interesse, Stähle hinsichtlich ihres Kaltrissverhaltens einzustufen. In der DIN EN 1011-2 Ausgabe Mai 2001 sind im Anhang C zwei Methoden zur Vermeidung von Wasserstoffrissen in unlegierten Stählen, Feinkornbaustählen und niedriglegierten Stählen beschrieben:

Methode A (C.2)

Hier wird das Kohlenstoffäquivalent CE zu Beurteilung herangezogen. Es lautet:

CE [%] = C +Mn/6 + (Cr + Mo + V) / 6 + (Ni + Cu) / 15 Dieses CE basiert auf der Härtbarkeit des Stahles und berücksichtigt weniger die Kaltrissempfindlichkeit der hochfesten Feinkornbaustähle.

Durch umfangreiche Untersuchungen zum Kaltrissverhalten von Stählen beim Schweißen der Fa. Thyssen hate sich das Kohlenstoffäquivalent CET ergeben. Dieselbec Konzept fand seinen Niederschlag im SEW 088 und wurde als Methode B übernommen.

Methode B (C.3)

Spezielle Kaltrisstests auch an Schweißverbindungen [4] ermöglichten ein genaueres Bestimmen der notwendigen Vorwärmung durch das abgeleitete Kohlenstoffäquivalent CET. Es lautet:

$$CET [\%] = C + (Mn + Mo) / 10 + (Cr + Cu) / 20 + Ni / 40$$

Das Kaltrissverhalten von Schweißverbindungen wird außer von der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffes und des Schweißgutes CET auch von der Blechdicke d, dem Wasserstoffgehalt des Schweißgutes HD und dem Wärmeeinbringen Q beim Schweißen sowie dem Eigenspannungszustand der Verbindung maßgebend bestimmt. Durch die Auswertung einer Vielzahl entsprechender Untersuchungen wurde die Wirkung dieser Einflussgrößen auf die Vorwärmtemperatur deutlich [5]. Sie lässt sich mittels nachfolgender Summenformel beschreiben:

$$T_p$$
 [C] = 700 CET + 160 tanh (d/35) + 62 HD 0,35 + (53 CET - 32) Q - 330

In dieser Gleichung bedeuten CET das Kohlenstoffäquivalent in %, d die Blechdicke in mm, HD den Wasserstoffgehalt in cm³ / 100 g deponiertes Schweißgut nach DIN 8572 und Q das Wärmeeinbringen in kJ/mm. Bei der Ableitung dieser Beziehung wurden Eigenspannungen in Höhe der Streckgrenze des Grundwerkstoffs bzw. des Schweißgutes unterstellt. Bei Schweißverbindungen mit günstigerem Eigenspannungsniveau sind niedrigere Vorwärmtemperaturen vertretbar. Im Falle von Schweißverbindungen mit extrem hohem Verspannungsgrad (z.B. bei Nähten an Stutzen oder Rohrknoten) können jedoch höhere Vorwärmtemperaturen erforderlich sein.



Bild 6: Typische Kaltrisse bei hochfesten Stählen

Beim Auftreten von Kaltrissen stellt man immer wieder fest, dass zwar die richtige Vorwärmtemperatur gewählt, jedoch die tatsächliche Wärmeableitung am Bauteil nicht richtig eingeschätzt wurde. Zum einen muss die Vorwärmtemperatur in ausreichendem Abstand von der Schweißnaht gemessen werden, zum anderen muss natürlich an Stellen, wo mehrere Schweißnähte zusammentreffen und damit neben der höheren Wärmeableitung noch dreidimensionale Spannungszustände auftreten können, welche die Kaltrissbildung zusätzlich begünstigen, auch sorgfältiger vorgewärmt werden.

7 Mechanisch-technologische Eigenschaften

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften von Schweißverbindungen werden in erster Linie bestimmt durch die chemische Zusammensetzung von Stahl und Schweißgut sowie die beim Schweißen auftretenden Temperaturzyklen. Die wichtigsten Einflussgrößen bezüglich der Temperaturzyklen sind das Schweißverfahren, die Vorwärmtemperatur, die Streckenenergie sowie die Werkstückdicke und die Nahtgeometrie. Diese verfahrenstechnischen Einflussgrößen fasst man zu einer für den Temperatur-Zeit-Verlauf beim Schweißen charakteristischen Kenngröße, die Abkühlzeit t 8/5 zusammen.

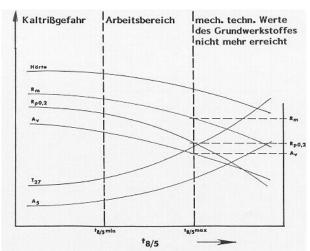


Bild 7: Auswirkung der Abkühlzeit t 8/5

Eine zu schnelle Abkühlung der Schweißraupen aus dem Austenitgebiet wirkt sich ungünstig auf das Verformungsverhalten der Verbindung aus. Es besteht außerdem die Gefahr von Kaltrissen. Infolge des niedrigeren Wasserstoffgehaltes (HD ca. 2-3) beim MAG-Schweißen liegt die

Mindestabkühlzeit t 8/5 zur Vermeidung von Kaltrissen hier bei 5 s.

Eine zu langsame Abkühlung der Schweißraupen aus dem Austenitgebiet hat dagegen zur Folge, dass die Festigkeitseigenschaften des Schweißgutes nicht mehr denen des Grundwerkstoffes entsprechen. Es besteht dabei außerdem die Gefahr, dass die WEZ eine zu niedrige Zähigkeit aufweist. Bei hochbeanspruchten Konstruktionen empfiehlt sich deshalb, die Abkühlzeit t 8/5 entsprechend nach oben zu begrenzen.

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften werden also hauptsächlich von t 8/5 beeinflusst. Die Abkühlzeit wird dabei von folgenden Einflussgrößen bestimmt:

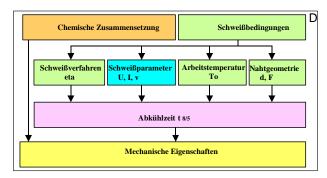


Bild 8: Einfluss auf mechanischen Eigenschaften

Aus Bild 8 ist ersichtlich, dass die Wärmeeinbringung (Schweißparameter) während des Schweißens als veränderlichen Haupteinflussfaktor auf die Eigenschaften der Schweißungen angesehen werden kann. Sie beeinflusst am meisten den Temperatur-Zeit-Zyklus, der sich während des Schweißens abspielt. Nach der neuen DIN EN 1011-1 Ausgabe April 1998 kann der Wert für die Wärmeeinbringung Q wie folgt berechnet werden:

$Q = k \times U \times J / v \times 10^{-3} in kJ/mm$

Noch mehr als für den Grundwerkstoff gilt die Abkühlzeit auch für den Schweißzusatz (siehe Bild 9).

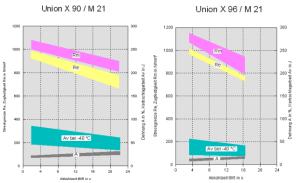


Bild 9: Einfluss der Abkühlzeit t _{8/5} auf die Schweißguteigenschaften

Aus der Formel für die Wärmeeinbringung ist ersichtlich, dass diese am besten durch die Schweißgeschwindigkeit gesteuert werden kann. Eine Verdoppelung der Geschwindigkeit bringt eine Halbierung der Wärmeeinbringung, ohne die Abschmelzleistung zu verringern, dabei wird jedoch die Anzahl der Lagen auch verdoppelt.

Der thermische Wirkungsgrad k beträgt beim MAG – Schweißen 0,8 nach DIN EN 1011-1 laut Tabelle 1. Die Höhe der Vorwärmtemperatur wird durch das CET bestimmt, wobei das CET des Schweißgutes meist der kritischere Wert ist.

8 Einführung eines hochfesten Stahles S1100QL

Bei der Einführung neuer Werkstoffe in der Fertigung sind umfangreiche Untersuchungen bezüglich der mechanisch-technologischen Werkstoffeigenschaften nötig. Daneben müssen zunächst die Voraussetzungen in Bezug auf Gesetzeslage, Regelwerk und Normung geprüft werden. Im Mobilkranbau haben sich heute genormte Vergütungsstähle mit Streckgrenzen von 690 N/mm² bis 960 N/mm² schon sehr früh als Standard etabliert. Die Einführung eines neuen, nicht genormten Feinkornbaustahles im Fahrzeugkranbau soll nachfolgend am Beispiel eines Stahles mit 1100 N/mm² Streckgrenze beschrieben werden.

Die Anzahl von Stahlherstellern, die das Know-how besitzen ultrahochfeste Stähle herzustellen verringert sich, wenn Anforderungen an Streckgrenze und Reinheit steigen. Nur wenige Hersteller bieten zurzeit einen hochfesten, zähen Feinkornbaustahl mit 1100 N/mm² Streckgrenze an:

SSAB Schweden: Weldox 1100

Thyssen Steel Deutschland: Xabo 1100

Dillinger Hütte: Dillimax 1100VoestAlpine: alform 1100 x-treme

Für den S1300QL gibt es derzeit nur 2 Hersteller: SSAB und ThyssenSteel

Die Aufgabenstellung für die Verfahrensprüfung war eine Mindeststreckgrenze von 1100 N/mm² bei belassener Nahtüberhöhung. Für die Kerbschlagzähigkeit wurden 27J bei- 40°C als Mindestanforderung zugrunde gelegt. Als Schweißzusatz wurde für das Heften ein weicher Schweißzusatz EN 440-G 50 3 M G4Si1, die Wurzelschweißung ein Zusatzwerkstoff mit Rp 0,2=700 N/mm² (G 69 4 M Mn3Ni1CrMo) und für die Füll- und Decklagen ein hochfester Zusatzwerkstoff mit 900 N/mm² Streckgrenze (G 89 4 M Mn4Ni2,5CrMo) nach [6] verwendet. Sämtliche Schweißdaten wurden zunächst nach SEW 088 [7] ermittelt. Das CET lag bei beiden Sorten bei 0,39 und unter Beachtung der Schweißgutanalyse bei 0,42. Hierbei gilt gemäß SEW 088:

"Wenn das CET des Grundwerkstoffes das des Schweißgutes (SG) um 0,03% übersteigt, ist der Grundwerkstoff maßgebend. Anderenfalls ist das um 0,03% erhöhte CET des Schweißgutes zu verwenden"

Dies bedeutet in unserem Fall, dass für die Vorwärmung ein CET von 0,42+0,03 = 0,45 gilt.

Diese Erkenntnis ist besonders wichtig bei z. B. einem hochfesten TM-Stahl, der bei der entsprechenden Dicke auf des niedrigen CET nicht vorgewärmt werden müsste. Da der Schweißzusatz aber wegen der höheren Legierungsbestandteile ein wesentlich höheres CET aufweist, muss wegen dem Schweißzusatz vorgewärmt werden um keine Kaltrisse zu erhalten.

Es war von vorne herein klar, dass die geforderten Werkstoffwerte der Schweißverbindung nur mit extrem kurzen Abkühlzeiten erreicht werden können. Für die Versuchsreihe wurde ein Abkühlzeitfenster (t8/5) von 5 – 8 s über die Schweißparameter eingestellt und daraus Zugversuche mit abgearbeiteter Nahtüberhöhung durchgeführt. Die Streckgrenze des Schweißgutes lag erwartungsgemäß etwas unter den Werten des Grundwerkstoffes, waren aber durch die kurze Abkühlzeit und durch Aufmischungsvorgänge höher als die beim reinen Schweißgut.

Die Mittelwerte der Streckgrenze lagen bei allen Proben zwischen 960 und 1000N/mm².

Nachdem die Schweißparameter mit den vorangegangenen Versuchsreihen festgelegt waren, wurde anhand dieser Werte eine Schweißanweisung (WPS) erstellt, die als Arbeitsgrundlage für die nachfolgende Verfahrensprüfung mit nicht abgearbeiteter Nahtüberhöhung diente. Diese Vorgehensweise konnte festgelegt werden, da in der Praxis die Schweißnähte ebenfalls nicht abgeschliffen werden. Die Ergebnisse lagen dann alle über dem Grundwerkstoff.

Zusätzlich wurden verschiedene Schliffe angefertigt. Trotz der hohen Härteverläufe ist der Einsatz dieses Stahles aufgrund der guten Zähigkeitseigenschaften gegeben. Bild 10 zeigt einen typischen Härteverlauf durch letzte Decklage.

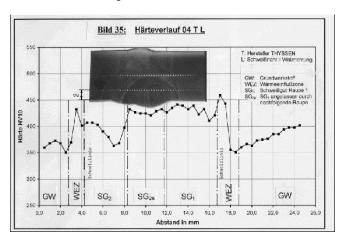


Bild 10: Härteverlauf durch die letzte Lage

9 Überwachung der Schweißdaten

Die Überwachung der wichtigsten Schweißdaten beschränkt sich in der Praxis auf die Kontrolle der Vorwärmtemperatur und ggfs. der Zwischenlagentemperatur sowie die Messung der Abkühlzeit t 8/5. Für den Praktiker ist es hilfreich, unter Verwendung der Diagramme im DVS-Merkblatt 0916 [6], die minimal und maximal zulässige Streckenenergie in Abhängigkeit der Blechdicke aufgrund der Vorgabe der Abkühlzeit t 8/5 zu bestimmen. Mit diesen Werten kann man in einem weiteren Diagramm abhängig vom Drahtelektrodendurchmesser die zugeordneten minimalen und maximalen Schweißgeschwindigkeiten ermitteln. Diese sind dann in der Praxis sehr einfach zu kontrollieren und zu dokumentieren. Von den Stahlherstellern gibt es entsprechende Programme zur Kontrolle der erforderlichen Schweißparameter.

Die erforderlich Schweißverfahrungsprüfung wird in der Regel nach dem **DVS Merkblatt 1702**

"Verfahrensprüfungen im konstruktiven Ingenieurbau" durchgeführt.

Diese Richtlinie enthält Grundsätze zur einheitlichen Durchführung von Verfahrensprüfungen an hochfesten, schweißgeeigneten Feinkornbaustählen.

Die Schweißer müssen eine Qualifikation nach DIN EN ISO 9606-1 nachweisen. Interne Schulungen und Unterweisungen der Schweißer über Vorwärmen und ggf. Nachwärmen sowie die Einhaltung der geforderten Wärmeeinbringung (Viellagentechnik) in Abhängigkeit der verwendeten Werkstoffe müssen laufend durchgeführt werden. Dabei ist es sinnvoll, dass der Schweißer die Schweißgeschwindigkeit über den Nahtaufbau und Nahtquerschnitt einstellt, da dies jederzeit einfach kontrolliert werden kann.

10 Anwendungsbeispiele

In vielen Industriebereichen spielt der Leichtbau eine immer größere Rolle. Durch die Entwicklung der ultrahochfesten Stähle bis 1300 N/mm² Streckgrenze sind neue Einsatzmöglichkeiten geschaffen worden. Die nachfolgenden Bilder zeigen einen Querschnitt von Beispielen in der Anwendung von hochfesten Feinkornstählen.



Bild 11: Autokran mit 750 t Traglast komplett verfahrbar



Bild 12: Autokran mit 1200 t Traglast (Fa. Liebherr)



Bild 13: Betonpumpe (Fa. Waitzinger)



Bild 14: LKW-Ladekran (Fa. Palfinger)



Bild 15: Anbaugeräte für Unimog (Fa. Mulag)



Bild 16: Schwerlast-Tranportfahrzeug (Fa. Goldhofer)



Bild 17: Teleskopausleger auf Schwerlastfahrzeug

11 Zusammenfassung

Hochfeste Feinkornstähle sind heute bei der Fertigung von Nutzfahrzeugen, insbesondere im Schwerlastbereich und im Mobilkranbau unverzichtbar und werden sich auch im Stahlbau vermehrt durchsetzen. Aufgrund der vorangegangenen Untersuchungen geht jedoch deutlich hervor, dass es sehr wichtig ist, die Wärmeführung genau festzulegen und entsprechend einzuhalten, um entsprechende mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißverbindungen zu erreichen. Die Ausführungen zeigen, dass das Kaltrissverhalten durch die chem. Zusammensetzung des Grundwerkstoffes und des Schweißgutes, die Blechdicke, den Wasserstoffgehalt des Schweißgutes, das Wärmeeinbringen während des Schweißens und den Spannungszustand beeinflusst. Eine Zunahme des Legierungsgehaltes, der Blechdicke und des Wasserstoffgehaltes erhöht die Kaltrissgefahr. Dagegen wird sie durch eine Erhöhung des Wärmeeinbringens vermindert.

Mit der neuen DIN EN 1011 Teil 1 und Teil 2 ist nun auch ein Normenwerk auf europäischer Ebene geschaffen worden, das es ermöglicht einheitliche Verarbeitungsregeln zumindest europaweit festzulegen.

12 Schrifttum

[1] Dr. Geyer, Ing.Mag. Rauch, Dipl.-Ing. Schütz, VO-EST-ALPINE Stahl Linz GmbH Hochfeste Feinkornstähle mit optimierten Verarbeitungseigenschaften Tagungsband zum Fortbildungsseminar für Schweißfachleute an der Schweißtechnischen Zentralanstalt in Wien,

[2] DIN EN 10149-1, Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen, September 1995, 3.5

[3] DIN EN ISO 13916 Anleitung zur -Messung der Vorwärm-, Zwischenlagen- und Haltetemperatur

[4] DIN EN 1011 Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe Teil 1: Allgemeine Anleitung für das Lichtbogenschweißen (April 1998) Teil 2: Lichtbogenschweißen von ferritischen Werkstoffen (Mai 2001)

[5] SEW 088, Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, Richtlinien für das Verhalten, besonders für das Schmelzschweißen, Oktober 1996, Stahl-Eisen-Werkstoffblatt (SEW) des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute.

[6] DVS-Merkblatt 0916: Metall-Schutzgasschweißen von Feinkornbaustählen.