

Hänsch · Krebs

Eigenstressen und Formänderungen in Schweißkonstruktionen

Grundlagen
und praktische Anwendungen

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

1	Einführung	1
1.1	Zielstellung und Inhalt	1
1.2	Eigenspannungen beim Schweißen	4
1.2.1	Entstehen und Arten der Eigenspannungen	4
1.2.2	Unterscheidung und Einteilung der Eigenspannungen	5
1.2.3	Beispiele typischer Eigenspannungsverteilungen	6
1.2.4	Wirkung der Eigenspannungen	8
1.3	Formänderungen, Bezeichnungen, Arten und Wirkungen	10
1.3.1	Schrumpfungen	11
1.3.2	Verzug und Krümmung (Biegeverzug)	12
1.3.3	Beulung und Verwerfung	13
	Schrifttum	16
2	Physikalische Werkstoffeigenschaften, Wärmeeintrag und Temperaturfelder	18
2.1	Wärmephysikalische Eigenschaften des Werkstoffs	18
2.2	Mechanische Eigenschaften des Werkstoffs und metallurgische Einflüsse beim Schweißen	20
2.3	Zum Entstehen von Rissen – Heiß- und Kaltrisse, Lamellarrisse/Terrassenbruch	21
2.3.1	Einflüsse auf das Entstehen von Heißrissen	21
2.3.2	Ursachen für das Entstehen von Heißrissen beim Unterpulver- und Laserstrahl- schweißen	24
2.3.3	Einflüsse auf das Entstehen von Kaltrissen	27
2.3.4	Zur Entstehung von Terrassenbrüchen	31
2.4	Zum Temperaturfeld beim Schweißen	32
2.4.1	Vereinfachte Übersicht zu Wärmequellen und Temperaturfeldern	33
2.4.2	Analytische Berechnung der Temperaturfelder	33
2.4.3	Praktische Anwendung der Temperaturfeld-Berechnung	34
2.4.3.1	Berechnung der Maximaltemperatur an definierten Punkten	34
2.4.3.2	Berechnung von Abkühlungsgeschwindigkeit und Abkühlungszeit	35
2.4.3.3	Berücksichtigung begrenzter Abmessungen und numerische Berechnung	36
2.5	Größen und Erfahrungswerte zum Wärmeeintrag beim Schmelzschweißen	37
	Schrifttum	38
3	Formänderungen – Schrumpfungen und zulässige Abweichungen in geschweißten Bauteilen	40
3.1	Grundlagen zu den Formänderungen beim Schweißen	40
3.1.1	Eigenspannungen und Formänderungen	40
3.1.2	Unterschiedliche Arten der Formänderungen	41
3.1.3	Wärmewirkungen und Schrumpfungen	41
3.2	Querschrumpfung durch Stumpfnähte und Kehlnähte	43
3.2.1	Querschrumpfung durch Stumpfnähte – mittig zur Stabachse/in der Plattenebene	43

6.2	Messverfahren für Längen und Winkel – lokale Maß- und Formänderungen	201
6.3	Messverfahren für Formänderungen in der Ebene	203
6.4	Messverfahren für räumliche Formänderungen	206
	Schrifttum	215
Anhang A – Geometrische Toleranzen nach DIN V ENV 1090-1		221
	Tabelle A-1 – Zulässige Abweichungen für geschweißte T-Querschnitte	221
	Tabelle A-2 – Zulässige Abweichungen für Kasten-Querschnitte und Aussteifungen	222
	Tabelle A-3 – Zulässige Abweichungen der Länge, Krümmung und Winkel an Bauteilen	223
	Tabelle A-4 – Zulässige Abweichungen für Stege und Aussteifungen	224
Anhang B – Abminderungsfaktoren		225
	zu Abschnitt 4.2 – Stabilitätsberechnung (Knicken, knickstabähnliches Beulen)	225
	zu Abschnitt 4.2.1.1 – Abminderungsfaktoren für Biegeknicken	225
	zu Abschnitt 4.2.1.2 – Abminderungsfaktoren für Biegedrill-Knicken	226
	zu Abschnitt 4.2.1.3 – Abminderungsfaktoren für Knickstabanalogie	227
	Tabelle B-1 – Abminderungsfaktor χ für Biegeknicken zu den Knickspannungslinien nach Tabelle 4-3	228
Größen, Bezeichnungen und Abkürzungen		229

4.2.1.3	Knickstab-ähnliches Ausbeulen breiter längsausgesteifter Druckgurte (Knickstab-analogie)	109
4.2.2	Platten- und Schalenbeulen	110
4.2.3	Querschnittsgestaltung von Druckgliedern	110
4.2.4	Beispiele für Schäden durch Ausbeulung – Einfluss der Eigenspannungen und Formänderungen durch das Schweißen	111
4.2.4.1	Zylinder-Mantel eines Silos	111
4.2.4.2	Zusammenbruch einer Kastenträgerbrücke	112
4.2.5	Kritische Beulfeldgröße, Kriterium zum Beulen dünnwandiger Stegbleche von Kastenträgern	112
4.3	Einfluss von Eigenspannungen unter Schwinglast und neue Bemessungsrichtlinien	114
4.3.1	Eigenspannungen und Schwingfestigkeit	114
4.3.2	Zur Schwingfestigkeit von geschweißten Bauteilen	117
4.3.2.1	Wöhlerlinien von Kleinproben und Bauteilproben	117
4.3.2.2	Einfluss höherer Lastwechselzahl und des Spannungsarmglühens (SPG)	118
4.3.2.3	Schwingfestigkeit und Mittelspannungseinfluss – Vergleich mit dem Durchschnitt	120
4.3.3	Schwingfestigkeitsnachweis – neue Richtlinien und Erhöhungsfaktor für die Wechselfestigkeit	121
4.3.3.1	Bestehende Vorschriften – ohne Eigenspannungseinfluss	121
4.3.3.2	Eigenspannungseinfluss nach neuen IIW-Empfehlungen und -Richtlinien	122
4.3.3.3	Vorschlag für Erhöhungsfaktor und differenzierte Bewertung	124
4.4	Bewertung des Einflusses der Eigenspannungen an typischen Bauteilen	124
4.4.1	Modell des Spannungszustandes in Schweißverbindungen und die Bedingungen für den Abbau der Eigenspannungen	125
4.4.2	Einfluss der Eigenspannungen auf die Tragfähigkeit typischer Bauteile unter Zug-Lastspannungen	127
4.4.3	Einfluss der Eigenspannungen auf druckbelastete Knickstäbe, Scheiben, Platten und Schalen – Stabilitätsfälle	129
4.4.4	Übersicht zu Eigenspannungseinfluss, Erhöhungsfaktor und Wanddickenbegrenzung .	130
4.5	Folgerungen zur Tragfähigkeit und Maßnahmen zur Verminderung des Eigenspannungseinflusses	131
4.5.1	Tragfähigkeit von Bauteilen unter dem Einfluss von Eigenspannungen	131
4.5.2	Anwendung des Spannungsarmglühens	131
4.5.3	Fertigungs- und festigkeitsgerechte Gestaltung von Trägeranschlüssen	132
4.5.4	Maßnahmen zur Verringerung des Eigenspannungseinflusses	133
4.5.5	Nachbehandlungen an konstruktiven Details	135
4.6	Sicherheitsnachweise für Bauteile mit unter Last geschweißten Verstärkungen	136
4.6.1	Konstruktionsformen und Wärmeableitung	136
4.6.2	Erforderliche Nachweise	136
4.6.3	Nachweis zum Zeitpunkt der größten Querschnittsschwächung (ZP 1)	137
4.6.4	Nachweise zum Zeitpunkt der Maxima der Dehnung (ZP 2) und der Schrumpfung (ZP 3)	139
4.6.5	Ausführungsbeispiele	140
	Schrifttum	141

4.2.1.3	Knickstab-ähnliches Ausbeulen breiter längsausgesteifter Druckgurte (Knickstab-analogie)	109
4.2.2	Platten- und Schalenbeulen	110
4.2.3	Querschnittsgestaltung von Druckgliedern	110
4.2.4	Beispiele für Schäden durch Ausbeulung – Einfluss der Eigenspannungen und Formänderungen durch das Schweißen	111
4.2.4.1	Zylinder-Mantel eines Silos	111
4.2.4.2	Zusammenbruch einer Kastenträgerbrücke	112
4.2.5	Kritische Beulfeldgröße, Kriterium zum Beulen dünnwandiger Stegbleche von Kastenträgern	112
4.3	Einfluss von Eigenspannungen unter Schwinglast und neue Bemessungsrichtlinien	114
4.3.1	Eigenspannungen und Schwingfestigkeit	114
4.3.2	Zur Schwingfestigkeit von geschweißten Bauteilen	117
4.3.2.1	Wöhlerlinien von Kleinproben und Bauteilproben	117
4.3.2.2	Einfluss höherer Lastwechselzahl und des Spannungsarmglühens (SPG)	118
4.3.2.3	Schwingfestigkeit und Mittelspannungseinfluss – Vergleich mit dem Durchschnitt	120
4.3.3	Schwingfestigkeitsnachweis – neue Richtlinien und Erhöhungsfaktor für die Wechselfestigkeit	121
4.3.3.1	Bestehende Vorschriften – ohne Eigenspannungseinfluss	121
4.3.3.2	Eigenspannungseinfluss nach neuen IIW-Empfehlungen und -Richtlinien	122
4.3.3.3	Vorschlag für Erhöhungsfaktor und differenzierte Bewertung	124
4.4	Bewertung des Einflusses der Eigenspannungen an typischen Bauteilen	124
4.4.1	Modell des Spannungszustandes in Schweißverbindungen und die Bedingungen für den Abbau der Eigenspannungen	125
4.4.2	Einfluss der Eigenspannungen auf die Tragfähigkeit typischer Bauteile unter Zug-Lastspannungen	127
4.4.3	Einfluss der Eigenspannungen auf druckbelastete Knickstäbe, Scheiben, Platten und Schalen – Stabilitätsfälle	129
4.4.4	Übersicht zu Eigenspannungseinfluss, Erhöhungsfaktor und Wanddickenbegrenzung .	130
4.5	Folgerungen zur Tragfähigkeit und Maßnahmen zur Verminderung des Eigenspannungseinflusses	131
4.5.1	Tragfähigkeit von Bauteilen unter dem Einfluss von Eigenspannungen	131
4.5.2	Anwendung des Spannungsarmglühens	131
4.5.3	Fertigungs- und festigkeitsgerechte Gestaltung von Trägeranschlüssen	132
4.5.4	Maßnahmen zur Verringerung des Eigenspannungseinflusses	133
4.5.5	Nachbehandlungen an konstruktiven Details	135
4.6	Sicherheitsnachweise für Bauteile mit unter Last geschweißten Verstärkungen	136
4.6.1	Konstruktionsformen und Wärmeableitung	136
4.6.2	Erforderliche Nachweise	136
4.6.3	Nachweis zum Zeitpunkt der größten Querschnittsschwächung (ZP 1)	137
4.6.4	Nachweise zum Zeitpunkt der Maxima der Dehnung (ZP 2) und der Schrumpfung (ZP 3)	139
4.6.5	Ausführungsbeispiele	140
	Schrifttum	141

6.2	Messverfahren für Längen und Winkel – lokale Maß- und Formänderungen	201
6.3	Messverfahren für Formänderungen in der Ebene	203
6.4	Messverfahren für räumliche Formänderungen	206
	Schrifttum	215
Anhang A – Geometrische Toleranzen nach DIN V ENV 1090-1		221
Tabelle A-1 – Zulässige Abweichungen für geschweißte T-Querschnitte		221
Tabelle A-2 – Zulässige Abweichungen für Kasten-Querschnitte und Aussteifungen		222
Tabelle A-3 – Zulässige Abweichungen der Länge, Krümmung und Winkel an Bauteilen		223
Tabelle A-4 – Zulässige Abweichungen für Stege und Aussteifungen		224
Anhang B – Abminderungsfaktoren		225
zu Abschnitt 4.2 – Stabilitätsberechnung (Knicken, knickstabähnliches Beulen)		225
zu Abschnitt 4.2.1.1 – Abminderungsfaktoren für Biegeknicken		225
zu Abschnitt 4.2.1.2 – Abminderungsfaktoren für Biegedrill-Knicken		226
zu Abschnitt 4.2.1.3 – Abminderungsfaktoren für Knickstabanalogie		227
Tabelle B-1 – Abminderungsfaktor χ für Biegeknicken zu den Knickspannungslinien nach Tabelle 4-3		228
Größen, Bezeichnungen und Abkürzungen		229