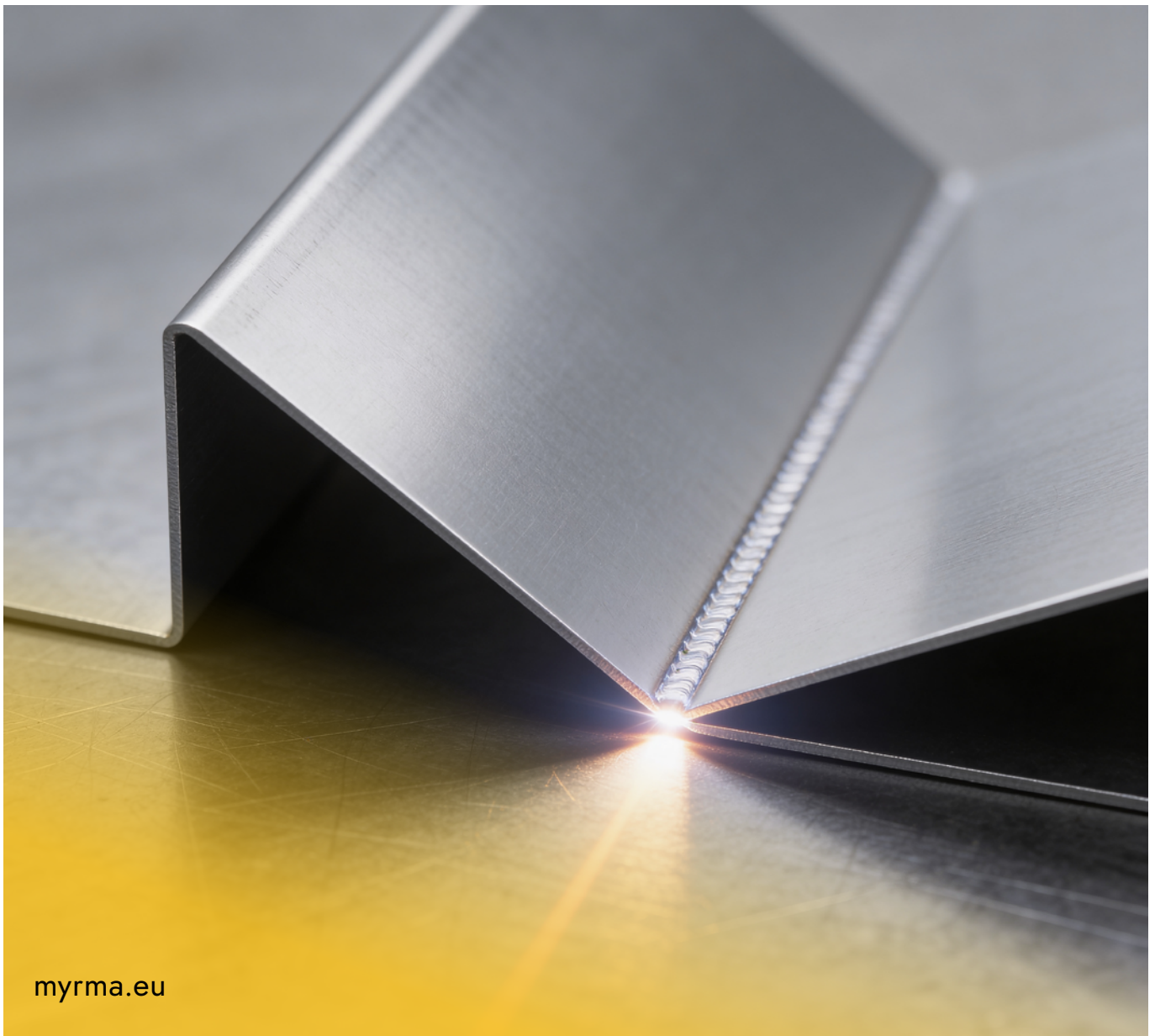




LASERSCHWEISSEN VON ALUMINIUM

PROZESSSTABILITÄT UND NAHTWIEDERHOLBARKEIT
IN DER INDUSTRIELLEN FERTIGUNG



Laserschweißen von Aluminium

Aluminium zählt seit Jahren zu den wichtigsten Konstruktionswerkstoffen in der Industrie – von der Automobilbranche über die Energietechnik bis hin zu komplexen Gehäusesystemen und Präzisionsbauteilen. Sein geringes Gewicht und seine guten mechanischen Eigenschaften machen es zur natürlichen Wahl überall dort, wo das Verhältnis von Festigkeit zu Masse entscheidend ist.

Aus der Perspektive der Fügetechnologien bleibt Aluminium jedoch ein anspruchsvoller Werkstoff. Insbesondere das Laserschweißen von Aluminium stellt hohe Anforderungen an die Prozessstabilität und die Parameterüberwachung. In der industriellen Praxis lautet die entscheidende Frage nicht, ob eine Schweißnaht hergestellt werden kann, sondern ob der Prozess unter Produktionsbedingungen wiederholbar und vorhersehbar aufrechterhalten werden kann.

Werkstoffeigenschaften und Prozessverhalten

Die Besonderheiten von Aluminium beim Laserschweißen ergeben sich unmittelbar aus seinen physikalisch-chemischen Eigenschaften. Aus ingenieurtechnischer Sicht sind drei Faktoren von größter Bedeutung.

Der erste ist die hohe Wärmeleitfähigkeit, die zu einer schnellen Energieableitung aus dem Strahleinwirkungsbereich führt. Um ein stabiles Schmelzbad aufrechtzuerhalten, ist daher eine präzise Energiezufuhr in ausreichend konzentrierter Form erforderlich.

Der zweite Faktor ist die natürliche Aluminiumoxid-schicht (Al_2O_3). Ihr Schmelzpunkt übersteigt den des Grundwerkstoffs erheblich, was die Benetzung beeinträchtigt und zu Prozessinstabilitäten führen kann.

Der dritte Aspekt ist die Anfälligkeit für metallurgische Defekte, insbesondere Gasporosität und Heißrisse. Deren Auftreten ist eng mit den Prozessparametern und der Materialvorbereitung verknüpft.

Prozessstabilität als zentrale Herausforderung

Im Unterschied zu vielen konventionellen Schweißverfahren zeichnet sich der Laserprozess durch einen engen Bereich stabiler Parameter aus. Geringe Abweichungen können zu erheblichen Qualitätsveränderungen führen.

In der Praxis werden unter anderem folgende Phänomene beobachtet:

- ▶ Instabilität des Einschweißmodus (Übergänge zwischen Wärmeleitungs- und Keyhole-Modus),
- ▶ variable Einschweißtiefe,
- ▶ lokale Nahtunregelmäßigkeiten

Aus diesem Grund ist die zentrale Aufgabe nicht ein einzelner Parameter, sondern die Definition und Einhaltung eines Prozessfensters, in dem der Prozess stabil bleibt.

Kritische Parameter und Energiebilanz

Die wesentlichen Einflussgrößen auf den Prozessablauf sind:

- ▶ Laserleistung,
- ▶ Schweißgeschwindigkeit,
- ▶ Fokusposition,
- ▶ Schutzgasbedingungen,
- ▶ Oberflächenzustand des Werkstoffs.

Die Abhängigkeit zwischen Leistung und Geschwindigkeit lässt sich über die Streckenenergie des Prozesses beschreiben:

$$E = \frac{P}{v}$$

In der Praxis bedeutet dies, dass sowohl eine zu geringe als auch eine zu hohe Streckenenergie zur Entstehung von Defekten führen kann – entsprechend mangelnder Einschweißung oder übermäßiger Schmelzbadinstabilität.

Die Rolle der Oberflächenvorbereitung

Einer der am häufigsten unterschätzten Faktoren ist die Materialvorbereitung vor dem Prozess. Selbst optimal gewählte Parameter gewährleisten keine Stabilität, wenn die Oberfläche die Qualitätsanforderungen nicht erfüllt.

Von entscheidender Bedeutung sind:

- ▶ Entfernung der Oxidschicht,
- ▶ Beseitigung organischer Verunreinigungen,
- ▶ Sicherstellung reproduzierbarer Eingangsvoraussetzungen

Unter Produktionsbedingungen bedeutet dies, dass eine Standardisierung des Bauteilvorbereitungsprozesses unerlässlich ist.

Einschränkungen und Implementierungsrisiken

Das Laserschweißen von Aluminium ist nicht für jede Anwendung die optimale Lösung. Probleme treten insbesondere auf, wenn:

- ▶ der Werkstoff eine hohe Zusammensetzungsvariabilität aufweist,
- ▶ keine Kontrolle über die Oberflächenvorbereitung besteht,
- ▶ die Nahtgeometrie eine stabile Prozessführung nicht begünstigt,

Richtwerte für das Laserschweißen von Aluminium (Technologische Bereiche)

Materialdicke [mm]	Laserleistung [kW]	Schweißgeschwindigkeit [m/min]	Prozessmodus	Typische Anwendung
0,5 – 1,0	0,5 – 1,5	3 – 10	Wärmeleitungs- / flacher Keyhole-Modus	dünnwandige Gehäuse, Elektronik
1,0 – 2,0	1,0 – 2,5	2 – 6	Übergangs- / Keyhole-Modus	Präzisionsbauteile, Automotive
2,0 – 4,0	2,0 – 4,0	1 – 3	stabiler Keyhole-Modus	tragende Strukturen, Profile
4,0 – 6,0	3,0 – 6,0	0,5 – 2	tiefer Keyhole-Modus	Konstruktionselemente
6,0 – 8,0	5,0 – 8,0	0,3 – 1	tiefer Keyhole / Mehrlagennaht	schwerere Komponenten

Parameter ohne vorherige Validierung gewählt werden. In solchen Fällen steigen das Risiko der Prozessinstabilität und die fehlende Wiederholgenauigkeit erheblich.

Die Bedeutung der Prozessvalidierung

Aus der Perspektive industrieller Implementierungen ist die Prozessverifizierung vor der Produktionseinführung ein entscheidender Schritt.

Sie umfasst:

- ▶ Tests an realen Werkstoffen,
- ▶ Bestimmung des Prozessfensters,
- ▶ Analyse der Nahtqualität,
- ▶ Bewertung der Defektanfälligkeit,
- ▶ Verifizierung der Wiederholbarkeit.

Dieser Ansatz ermöglicht den Übergang von der experimentellen Phase zu einem kontrollierten Produktionsprozess.

Laserschweißen im Vergleich zu konventionellen Verfahren

Im Vergleich zu Verfahren wie WIG oder MIG bietet das Laserschweißen von Aluminium eine Reihe wesentlicher Vorteile:

- ▶ höhere Prozessgeschwindigkeit,
- ▶ begrenzte Wärmeeinflusszone,
- ▶ geringerer Verzug,
- ▶ bessere Wiederholbarkeit in der Serienproduktion.

Gleichzeitig ist diese Technologie hinsichtlich der Parameterüberwachung und der Qualität des Eingangsmaterials anspruchsvoller. In der Praxis sollte ihre Einführung daher von einer Machbarkeitsanalyse begleitet werden.

Anwendungsansatz – Schweißlabor

In der Praxis entscheiden sich immer mehr Unternehmen dafür, Tests in spezialisierten Laboren durchzuführen, die eine Nachbildung realer Bedingungen und eine Bewertung der Technologiemachbarkeit ermöglichen.

Das Schweißlabor von RMA in Gdynia bietet folgende Möglichkeiten:

- ▶ Tests des Laserschweißens von Aluminium an Kundenmaterialien,
- ▶ Optimierung der Prozessparameter,
- ▶ Analyse der Nahtqualität,
- ▶ Bewertung der Technologieeignung vor der Produktionseinführung.

Zusammenfassung

Das Laserschweißen von Aluminium ist eine Technologie mit großem Potenzial in der industriellen Fertigung, deren effektiver Einsatz jedoch einen datengestützten und praxisorientierten Ingenieursansatz erfordert.

Von entscheidender Bedeutung sind:

- ▶ Kontrolle der Prozessparameter,
- ▶ Qualität der Materialvorbereitung,
- ▶ sachgerechte Definition des Prozessfensters,
- ▶ vorherige Technologievalidierung.

Nur wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, lässt sich die Stabilität und Wiederholbarkeit erreichen, die für die Serienproduktion unerlässlich sind.

Typische Defekte beim Laserschweißen von Aluminium – Ursachen und Korrekturmaßnahmen

Defekt	Symptome	Hauptursachen	Korrekturmaßnahmen
Gasporosität	Poren im Nahtquerschnitt, verringerte Ermüdungsfestigkeit	· Verunreinigungen (Öle, Feuchtigkeit), instabiles Schmelzbad, zu hohe Streckenenergie	· gründliche Oberflächenreinigung, Parameteroptimierung (P/v), verbesserte Schutzgasabdeckung
Bindefehler / fehlende Einschweißung (LOP)	Unvollständige Durchschweißung	· zu geringe Leistung, zu hohe Geschwindigkeit, defokussierter Strahl	· Leistung erhöhen, Geschwindigkeit reduzieren, Fokusposition korrigieren
Übermäßige Einschweißung / Durchbrand	Materialdurchbruch, Kantenverformung	· zu hohe Streckenenergie, zu geringe Geschwindigkeit	· Leistung reduzieren, Geschwindigkeit erhöhen, Fokussierung korrigieren
Heißrisse	Mikrorisse in der Nahtachse	· ungünstige Legierungszusammensetzung, hohe Schrumpfspannungen, unzulängliche Wärmebilanz	· geeigneten Zusatzwerkstoff wählen, Parameter optimieren, Nahtgeometrie ändern
	Keyhole-Instabilität	· Variable Einschweißtiefe, Schweißspritzer · zu hohe oder instabile Leistung, fehlerhafte Fokussierung, Werkstoffreflexivität	· Parameter stabilisieren, Fokus optimieren, geeignete Laserquelle wählen
Nahtoxidation	Matte, graue Oberfläche, verschlechterte Eigenschaften	· unzureichende Schutzgasabdeckung, Gasverwirbelungen	· Gasdurchfluss erhöhen, Düse / Zuführungsrichtung ändern, Gas optimieren (z. B. Ar, He)
Übermäßige Schweißspritzer	Unregelmäßige Nahtoberfläche, Verschmutzung der Umgebung	· instabiles Schmelzbad, zu hohe Energie, Verunreinigungen	· Streckenenergie reduzieren, Sauberkeit verbessern, Prozess stabilisieren
	Bauteilverformung	· Geometrieänderung nach dem Schweißen · übermäßiger Wärmeeintrag, fehlende Spannvorrichtungskontrolle	· Streckenenergie reduzieren, Spannvorrichtungen einsetzen, Schweißpfad optimieren