

Rozdział 1

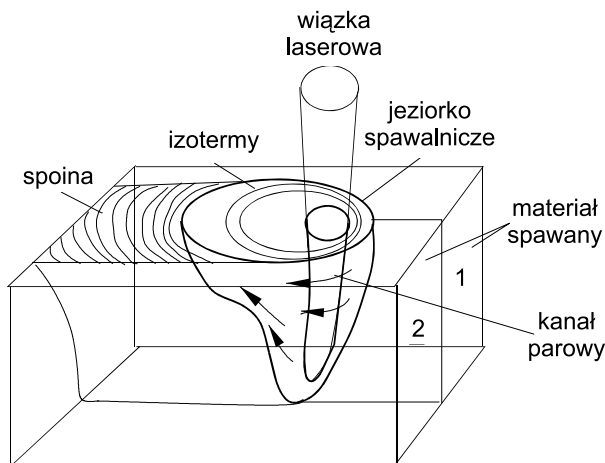
Wstęp

Coraz częstsze stosowanie laserów dużej mocy w zakładach przemysłowych związane jest z możliwością ich szerokiego wykorzystywania w technologii. Ten sam laser może być używany do cięcia, drażnienia i spawania, a czas potrzebny na wymianę głowicy laserowej na odpowiednią dla danego procesu technologicznego nie przekracza 30 minut. Zakres zastosowań laserów ciągle rośnie i jest związany ze wzrostem mocy laserów i jakości wiązki.

Największe średnie moce dla potrzeb obróbki materiałowej oferują obecnie lasery CO₂. Lasery z wyładowaniem poprzecznym proponowane przemysłowi posiadają moc 50 kW. Czynnikiem jakości wiązki M^2 , który jest miarą rzeczywistego rozmiaru ogniska wiązki w stosunku do ogniska wiązki gaussowskiej (dla której $M^2 = 1$), nie przekracza wartości 2–5 dla mocy 5 kW. Dla porównania, ten sam czynnik dla laserów Nd:YAG wynosi przy tak dużych mocach około 150. Mimo, że dziesięciokrotnie mniejsza długość fali laserów Nd:YAG zmniejsza różnicę w wielkości ogniska o czynnik 10 i tak, jak do tej pory, lasery CO₂ górują nad nimi jakością wiązki.

Promieniowanie lasera CO₂ o mocy 2–5 kW może być zogniskowane do średnicy 0,2 mm, co oznacza, że nawet przy stosunkowo niedużej mocy lasera uzyskujemy gęstość strumienia energii (natężenie wiązki) kilka MW/cm². Ta wartość jest porównywalna z gęstością strumienia energii uzyskiwaną w działach elektronowych i o dwa rzędy wyższa od wartości charakterystycznej dla łuków elektrycznych. Jest zatem jasne, że laser jest komercyjnym źródłem mocy o największym strumieniu energii, jakie jest dostępne obecnie dla przemysłu. Dodatkowo laser jest źródłem mocy, którym można łatwo i precyzyjnie sterować.

Tak duże natężenie wiązki laserowej w ognisku pozwala na spawanie typu kanałowego, tzn. wiązka wnika w materiał tworzącym przez siebie kanałem (tzw. kanał parowy) o średnicy niewiele większej od średnicy wiązki (patrz rys. 1.1). Inne zalety spawania laserowego to: wąska spoina i niewielka strefa wpływu ciepła, co skutkuje małym zniekształceniem spawanego materiału, a także pozwala na spawanie blisko obszarów wrażliwych na podwyższoną temperaturę, duże prędkości spawania – do kilkunastu metrów na minutę przy spawaniu cienkich blach laserami dużej mocy, błyskawiczne włączanie i wyłączanie wiązki, bardzo dokładne ustawianie toru wiązki, małe odparowanie materiału i związane z tym małe zanieczyszczenie środowiska. Laserem można spawać różne materiały, w tym tzw. materiały trudno spawalne, jak: stal żaroodporną, stopy tytanu, magnezu, a także łączyć ze sobą różne materiały.



Rys. 1.1. Schemat procesu spawania laserowego. Strzałki oznaczają przepływ roztopionego materiału.

Na temat laserowej obróbki materiałowej istnieje wyczerpująca literatura a znakomite przeglądy zagadnień związanych ze spawaniem laserowym można znaleźć w [1–4].

W tej książce nacisk położony jest raczej na zjawiska fizyczne związane z procesem spawania laserowego (głównie przy użyciu lasera CO_2) niż na praktyczne zagadnienia. Doświadczenie praktyczne na tym polu jest zresztą olbrzymie. Pamiętajmy, że pierwsze lasery zastosowano w przemyśle samochodowym w USA ok. 30 lat temu, a pierwszy laser o mocy 5 kW (produkcji amerykańskiej) został zainstalowany w Europie w 1977 r. Gorzej jest ze zrozumieniem fizyki procesu. Do tej pory, na przykład, nie istnieje ogólnie zaakceptowany i potwierdzony doświadczalnie model teoretyczny opisujący proces spawania laserowego. Brak takiego pełnego modelu wynika ze złożoności procesu spawania laserowego i znacznej liczby zjawisk, które musi on uwzględniać. Głębokie spawanie zawiera powstawanie i podtrzymywanie kanału parowego (jako rezultat oddziaływania wiązki laserowej z metalem), przekaz energii z wiązki laserowej do ścianek kanału i plazmy wypełniającej kanał, oddziaływanie z obłokiem plazmowym nad powierzchnią spawaną, parowanie, przepływ roztopionego materiału, przekaz energii między różnymi fazami (stanami skupienia) gazową, ciekłą i stałą itp. Dodatkowo proces spawania laserowego jest procesem niestabilnym a jego dynamika nie jest całkowicie zrozumiała. Występuje szereg niestacjonarnych zjawisk zarówno w cieczy jak i gazie, które powinny być uwzględniane w modelu teoretycznym opisującym proces spawania. Należą do nich: ablacja, gazodynamika par metalu, hydrodynamika jeziora spawalniczego, wyrzucanie mikrokropli itp.

Najważniejszym z nich jest niestabilność kanału parowego. Równowaga ciśnień w kanale parowym, utrzymująca ścianki kanału i chroniąca kanał przed za-

laniem go ciekłym metalem, jest równowagą dynamiczną, a kształt ścianek zmienia się nieustannie wskutek różnych niestabilności hydrodynamicznych. Drgania kanału parowego wywołują drgania jeziora spawalniczego, które z kolei wpływają na kanał parowy. Ponieważ warunki w jakich następuje krzepnięcie decydują o jakości spoiny (np. ze względu na tworzenie się pęcherzy powietrznych), dynamika drgań jeziora spawalniczego jest zagadnieniem pierwszorzędnej wagi.

Problemy związane z defektami spoin laserowych, takimi jak pory i pęknięcia, mogą być przezwyciężone jedynie poprzez lepsze zrozumienie procesów prowadzących do ich powstawania. Jedną z przyczyn powstawania porów może być uwalnianie, w procesie topnienia, zanieczyszczeń gazowych obecnych w strukturze krystalicznej materiału. Procesy hydrodynamiczne w jeziorze spawalniczym powinny prowadzić do ich ulotnienia a nie uwięzienia w krzepnącym materiale.

Zjawiska niestacjonarne zmieniają znacznie wartości parametrów wejściowych procesu spawania. Dlatego opracowanie modeli uwzględniających niestacjonarny charakter procesu spawania laserowego, odpowiednich metod monitorowania i sterowania procesem ma zasadnicze znaczenie dla niezawodności połączeń i pełnej automatyzacji procesu spawania.

Plazma wytwarzana w procesie spawania ma znaczny wpływ na przebieg procesu i dlatego poświęcono jej w tej książce sporo miejsca. Ponieważ jest to temat raczej nieznanym spawalnikom przedstawiono trochę podstawowych wiadomości o plazmie i jej diagnostyce. Większość materiału dotyczy, rzecz jasna, plazmy powstającej przy spawaniu laserowym. Plazma silnie pochłania i załamuje promieniowanie laserowe i tym samym wpływa na przekaz energii z wiązki laserowej do spawanego materiału. Gdy pochłanianie zachodzi nad powierzchnią próbki efekt jest zazwyczaj niepożądany, plazma osłania materiał przed promieniowaniem lasera. Gdy ciśnienie par metali osiąga 0,1 MPa, a temperatura plazmy wynosi 10000–15000 K, wtedy gęstość elektronów w plazmie jest ok. $2,5 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$. W tych warunkach współczynnik absorpcji promieniowania lasera CO_2 wynosi dla par metali kilka cm^{-1} . To oznacza, że gęsty obłok plazmowy może zablokować promieniowanie laserowe na drodze kilku milimetrów. W niektórych jednak przypadkach, gdy powierzchnia metalowa odbija silnie podczerwone promieniowanie lasera, obłok plazmowy poprzez własne promieniowanie w zakresie nadfioletowym zapewnia lepsze sprzężenie cieplne między laserem a próbką.

Nawet gdy dominującym mechanizmem absorpcji jest absorpcja Fresnela, jak to ma miejsce w przypadku dużych prędkości spawania, zachowanie się obłoku plazmowego odzwierciedla proces absorpcji w kanale parowym, a tym samym cały proces spawania. Dlatego sygnały optyczne z obłoku plazmowego są podstawowymi sygnałami służącymi do monitorowania przebiegu procesu, a co za tym idzie do kontroli i sterowania procesami technologicznymi. Pomiar spektroskopowe pozwalają na detekcję emisji promieniowania różnych cząstek, co ma także znaczenie przy kontroli procesów spajania ze sobą różnych metali. Na przykład przy spajaniu miedzi ze stalą można rejestrować stosunek natężeń linii widmowych Cu i Fe i w ten sposób kontrolować prawidłowy przebieg procesu.

Większość używanych w przemyśle metod monitorowania procesu opartych jest na pomiarze sygnałów optycznych z wykorzystaniem sygnału odniesienia. Metoda ta, choć ideowo prosta, jest niewygodna, ponieważ wymaga każdorazowo dobrania takiego sygnału w zależności od parametrów spawania i spawanego materiału. Opracowanie metody monitorowania nie wymagającej sygnału odniesienia ciągle jest wyzwaniem i wymaga lepszego zrozumienia procesu spawania i emitowanych w jego trakcie sygnałów. Nie ma również dobrze opracowanych metod pozwalających na wyłapywanie usterek spoiny.

Wymienione powyżej zagadnienia są tematem tej książki. Należy jednak pamiętać, że wyniki doświadczalne którymi dysponujemy, nie są jednoznaczne i nie zapewniają jasnego obrazu obserwowanych zjawisk, a modele teoretyczne są w wielu przypadkach dość daleko idącym przybliżeniem.