

Hartowanie diodowym laserem wysokiej mocy

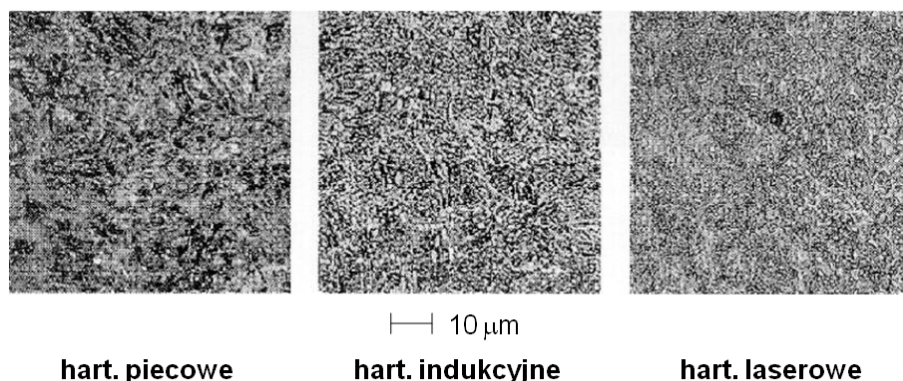
Hartowanie należy do najwcześniej opanowanych procesów obróbki cieplnej. Najstarszymi z metod konwencjonalnych jest hartowanie płomieniowe i piecowe. Młodszą technologią jest hartowanie indukcyjne a także powierzchniowe hartowanie wiązką laserową, które stosowane jest z powodzeniem w przemyśle od około 10 lat.

Proces obróbki „twardych” materiałów powinien zostać optymalnie przeprowadzony. Rosnący udział tworzyw sztucznych i kompozytów w konstrukcjach powoduje, że elementy metalowe współpracujące z tworzywami sztucznymi wzmocnionymi włóknem szklanym są narażone na zwiększoną ścieralność. W związku z tym dużą uwagę poświęca się hartowaniu współpracujących powierzchni.

Wszystkie metody hartowania charakteryzują się wprowadzeniem dużej ilości energii do wnętrza materiału. W przypadku tradycyjnych metod hartowania wymagane jest stosowanie naddatków na dalszą obróbkę, a konieczność usunięcia naprężeń hartowniczych wiąże się dodatkowymi kosztami. Koszty te można zminimalizować poprzez takie przeprowadzenie procesu hartowania, by hartowany detal nie wymagał dalszej obróbki. Przy wymaganiach stawianych nowoczesnym konstrukcjom wybór technologii hartowania powinien być podyktowany wymogami technicznymi, a nie możliwościami wykonawczymi. Musi się on opierać na uzasadnionych technicznie przesłankach, a nie na dotychczasowym doświadczeniu czy też o konieczność stosowania tradycyjnych metod.

Zastosowanie hartowania laserowego umożliwia obróbkę części, które dotąd nie mogły być hartowane innymi metodami. Stwarza to nowe możliwości konstrukcji i rozwoju. Metoda jest przyjazna dla środowiska oraz nie wymaga stosowania pomocniczych procesów oraz użycia mediów chłodzących (wody czy oleju). Inną zaletą opisywanej metody jest jej energooszczędność, szybkość oraz fakt, że hartowane detale są niemal natychmiast dostępne w dalszym procesie produkcji.

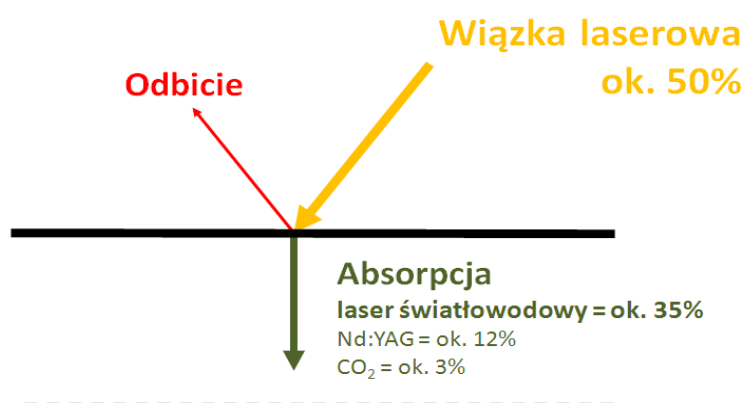
Do hartowania powierzchniowego predysponowane są takie materiały jak: stale konstrukcyjne, stale do ulepszania cieplnego, staliwa, żeliwa oraz odlewy z żeliwa modyfikowanego i sferoidalnego. Dobrze hartują się materiały o zawartości węgla wynoszącej minimum 0,22% ich masy. Technologia hartowania laserowego pozwala na obróbkę materiałów już wcześniej nawęglonych lub nazonotowanych plazmowo. W wyniku procesu otrzymujemy drobniejszą sieć krystaliczną w porównaniu do hartowania piecowego i indukcyjnego (Rysunek 1).



Rysunek 1. Sieć krystaliczna w wyniku różnych metod hartowania
Źródło: Fraunhofer IWS Dresden

Technologia hartowania laserowego jest w pełni zautomatyzowana. Głowica wiązki laserowej zamocowana jest na końcówce manipulatora robota przemysłowego. Za pomocą specjalistycznego oprogramowania współpracującego z systemami CAD/CAM programuje się drogę wiązki laserowej. Alternatywą jest ręczne wyznaczanie drogi wiązki laserowej (punkt po punkcie) przy użyciu oprogramowania typu Teach-in.

Oprócz tradycyjnych laserów CO₂ i laserów Nd:YAG stosuje się również coraz częściej diodowe lasery światłowodowe. Długość fali emitowanej przez laser diodowy jest krótsza (np. 800 nm) niż ma to miejsce w przypadku pozostałych źródeł promieniowania laserowego, co znacznie zwiększa absorpcję energii przez materiał. Sprawność lasera HLDDL wynosi około 35% (Rysunek 2).

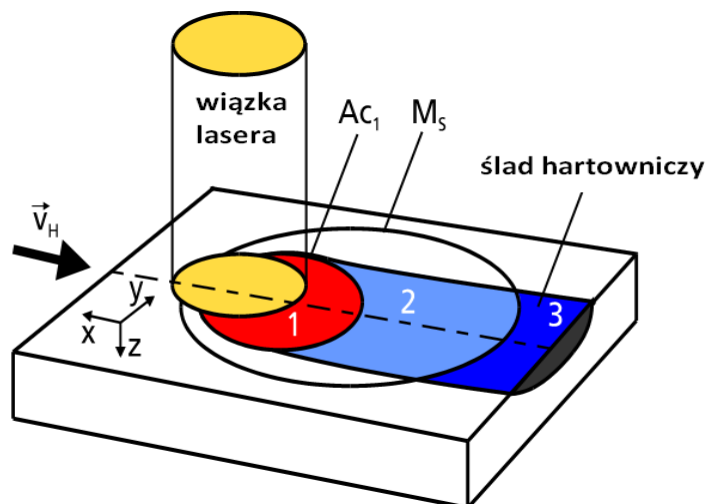


Rysunek 2. Rozkład mocy wiązki lasera.
Wszystkie wartości odnoszą się do mocy wejściowej lasera.
Źródło: opracowanie własne firmy ALOtec Dresden GmbH

Rozkład wiązki mocy lasera składa się z dwóch składowych: absorpcji oraz odbicia. W przypadku takich metali jak srebro, miedź, aluminium lub wypolerowanych powierzchni stalowych występuje „efekt lustra” i składowa odbicia jest większa od

absorpcji. W przypadku, gdy kąt padania wiązki jest większy niż 62° , składowa absorpcji wynosi zero¹.

W procesie hartowania laserowego wiązka lasera nagrzewa warstwy zewnętrzne obrabianego materiału. Powstaje różnica temperatur pomiędzy temperaturą powierzchni (maks. temp.) a temperaturą rdzenia. Powierzchnia materiału nagrzewana jest do osiągnięcia temperatury przemiany austenitycznej z prędkością 1000K na sekundę, a proces podlega kontroli aż do temperatury topnienia. Czas utrzymywania się temperatury wynosi od 10^{-3}s do 10s . Po osiągnięciu docelowej temperatury wiązka laserowa przesuwa się na kolejny obrabiany fragment powierzchni. Pod wpływem wysokiej temperatury dokonuje się zmiana struktury atomowej – atomy węgla zmieniają swoją pozycję (przemiana austenityczna)². Powierzchnia, na którą przestaje padać wiązka lasera schładza się samoistnie. Prędkość schładzania zależna jest m.in. od przewodnictwa cieplnego hartowanego materiału, zawartości węgla oraz intensywności mocy lasera. Dzięki szybkiemu schładzaniu struktura materiału nie powraca już do swojej pierwotnej formy i tworzy się bardzo twarda struktura metalu – martenzyt (Rysunek 3).



Objaśnienia:

- 1 – obszar przemiany austenitycznej
- 2 – obszar przemiany martenzytycznej
- 3 – obszar struktury martenzytycznej
- AC_1 – temperatura początku przemiany austenitycznej
- M_s – temperatura początku przemiany martenzytycznej

Rysunek 3. Schemat hartowania laserowego

Źródło: opracowanie własne firmy ALOtec Dresden GmbH

Uzyskiwane twardości odpowiadają górnej granicy przemiany martenzytycznej, a głębokość hartowania zależy od rodzaju materiału i w praktyce nie przekracza $1,5\text{ mm}$. Dla większych głębokości hartowania wymagana jest większa objętość otaczającego materiału, tak aby szybko odprowadzić ciepło i aby poddany obróbce cieplnej obszar schłodził się wystarczająco szybko³.

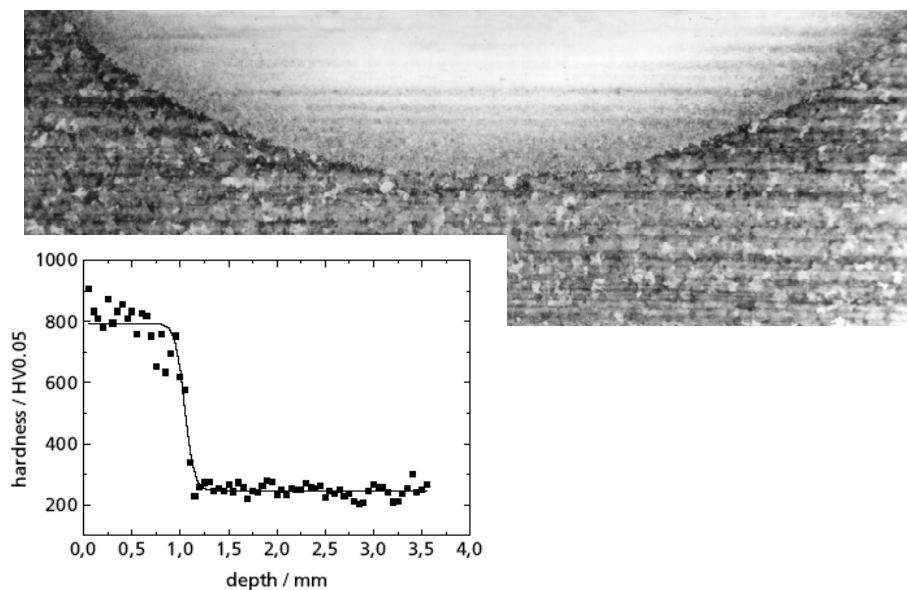
¹ por. Ernhardt, Heine, Prommersberger, „Laser in der Materialbearbeitung“, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1. Auflage 1993, s. 165

² por. Ernhardt, Heine, Prommersberger, „Laser in der Materialbearbeitung“, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1. Auflage 1993, s. 163

³ por. B. Leibinger, „Werkzeug Laser. Ein Lichtstrahl erobert die industrielle Fertigung“, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1. Auflage 2006, s. 197

Standardowo pracuje się w normalnych warunkach atmosferycznych. Jeżeli pojawiają się różnego rodzaju tlenki na powierzchni hartowanego przedmiotu jest niepożądane, możliwe jest hartowanie laserowe w atmosferze gazu ochronnego.

Hartowanie laserowe wymaga stosunkowo niewielkiej koncentracji mocy wiązki, która formowana jest w ten sposób, aby padała na jak największą powierzchnię. Często uzyskuje się prostokątne powierzchnie obrabiane. Stosuje się również systemy optyczne, które przemieszczają wiązkę laserową o okrągłej plamce tam i z powrotem. Dzięki temu na powierzchni obrabianego przedmiotu powstaje linia z niemalże równomierną gęstością mocy wiązki. Maksymalna osiągnięta szerokość śladu hartowniczego wynosi ok. 60 mm a typowy przekrój śladu hartowniczego ilustruje .



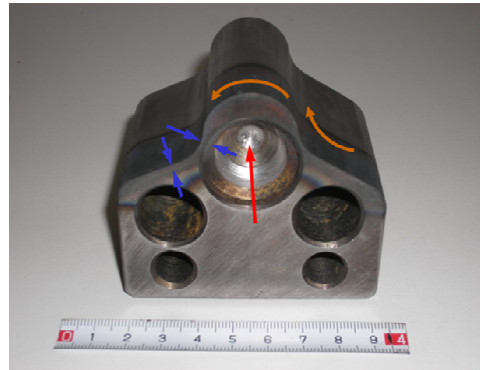
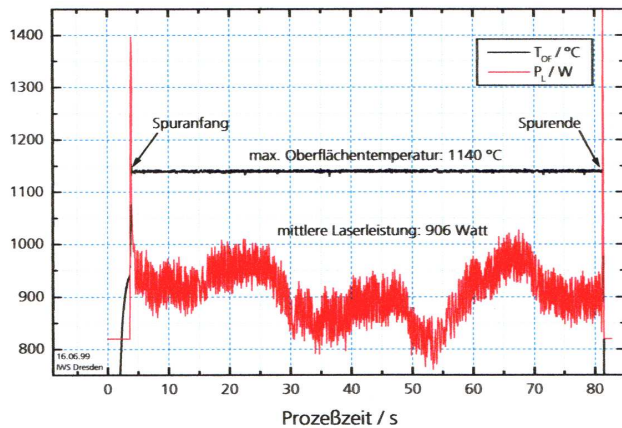
Rysunek 4. Przekrój śladu hartowniczego oraz zależność twardości od głębokości materiału

Źródło: Fraunhofer IWS Dresden

Z rysunku 4 wynika, że na brzegach śladu hartowniczego detal zahartowany jest na mniejszej głębokości. Jest to spowodowane bocznym odprowadzaniem ciepła w czasie nagrzewania materiału. Wykres zależności twardości zahartowanego materiału od głębokości ilustruje natomiast skokowy spadek twardości materiału po osiągnięciu maksymalnej głębokości hartowania. Konsekwencją tego jest fakt, że wytrzymałość na rozciąganie rdzenia materiału pozostaje na tym samym poziomie, natomiast możliwość pęknięcia materiału zostaje zredukowana poprzez korzystny rozkład naprężeń.

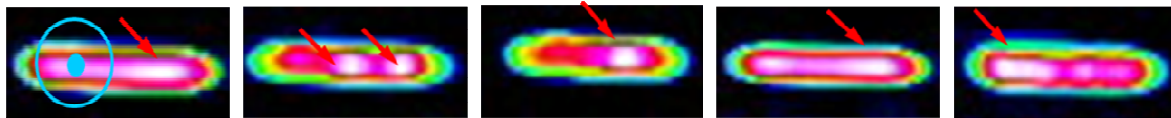
Hartowaniu podlegają metale w stałym stanie skupienia. Dlatego dąży się do wyeliminowania najdrobniejszych nadtopień powierzchni obrabianego materiału. Cel ten osiąga się w przypadku utrzymania temperatury procesu hartowania na stałym poziomie. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu systemu regulacji mocy lasera (Rysunek 5), który z dokładnością $\pm 10K$ pozwala utrzymać stałą temperaturę powierzchni obrabianego materiału, także przy zmiennym przewodnictwie cieplnym materiału. Zapewnia to osiągnięcie wysokiej jakości poprzez spełnienie podstawowego warunku,

jakim jest równomierne zahartowanie detalu. System regulacji mocy lasera eliminuje także niekorzystne zjawiska nadtopienia ostrych krawędzi ⁴.



Rysunek 5. Regulacja mocy lasera i zmienne przewodnictwo cieplne materiału.
Źródło: <http://alotec.de/index.php/pl/downloads/modu-lompocpro> (20.07.2010)

Zasada działania systemu regulacji mocy lasera jest następująca: temperatura powierzchni materiału jest monitorowana przez specjalną kamerę termowizyjną (Rysunek 6), której sygnał jest przetwarzany przez system regulacji mocy lasera. Następuje to poprzez przyporządkowanie punkt po punkcie wartości temperaturowych do elementów powierzchni hartowanej.



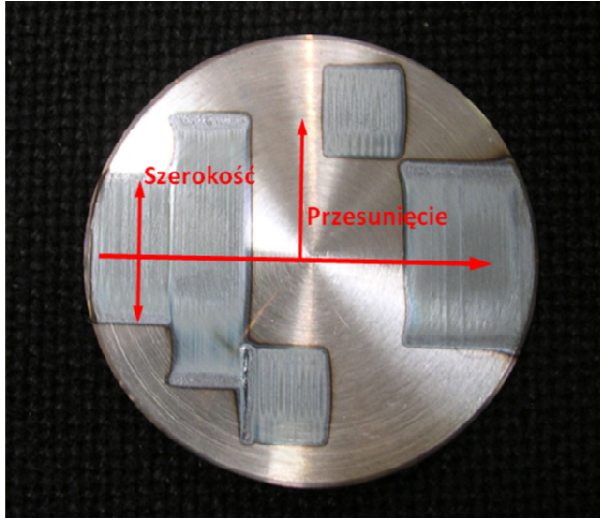
Rysunek 6. Pomiar temperatury procesu za pomocą kamery termowizyjnej
Źródło: opracowanie własne firmy ALOtec Dresden GmbH

Rysunek 6 ilustruje rozkład temperatury na powierzchni detalu w miejscach poddanych obróbce cieplnej. Kolor biały reprezentuje najwyższą wartość temperatury, której zbyt wysoka wartość spowodowałaby niepożądane nadtopienia obrabianej powierzchni. Rozkład temperatury procesu jest trudny do przewidzenia z góry, dlatego ważne jest całościowe ujęcie wszystkich wartości, co umożliwia kamera termowizyjna. Tradycyjny pomiar pirometrem (jasnoniebieski okrąg) jest w tym zakresie dużo mniej precyzyjny, z uwagi na fakt, że jest to pomiar punktowy.

Procesy hartowania mają zastosowanie do części lub całości obrabianych detali (Rysunek 7). Zahartowaniu ulegają jedynie zewnętrzne warstwy materiału, dzięki czemu wytrzymałość na rozciąganie rdzenia pozostaje na tym samym poziomie, natomiast możliwość pęknięcia materiału zostaje zredukowana poprzez korzystny rozkład naprężeń. W procesie hartowania laserowego wprowadza się do materiału tylko 20% ciepła w porównaniu do hartowania indukcyjnego. Tym samym ogranicza się konieczność dalszej obróbki mechanicznej materiału. Hartowanie laserowe pozwala na przeprowadzenie operacji w stosunkowo krótkim czasie. Powierzchnia hartowana może mieć dowolny kształt, a detal może być hartowany na zmienną głębokość. Rozwinięte

⁴ por. Hügel, Graf, Laser in der Fertigung, GWV Fachverlage GmbH, 2 Auflage Wiesbaden 2009, s.282-283

we współpracy firmy ALOtec Dresden GmbH z Instytutem Fraunhofera w Dreźnie systemy skanujące tzw. skanery, umożliwiają hartowanie skomplikowanych kształtów o zmiennej szerokości ścieżki hartowania. Stosuje się do tego częstotliwość skanującą 200Hz.



Rysunek 7. Hartowanie wybranych elementów powierzchni detalu z użyciem skanera
Źródło: Fraunhofer IWS Dresden

Hartowanie laserowe pomimo omówionych zalet posiada również pewne ograniczenia techniczne: niemożliwe jest nakładanie na siebie śladów hartowniczych, gdyż we wspólnym obszarze występuje zjawisko obniżonej twardości hartowniczej z powodu podwójnego odpuszczania, minimalna odległość śladów hartowniczych wynosi ok. 1,0 - 1,5mm; hartowanie większych powierzchni polega na pokrywaniu tego obszaru równoległymi lub meandrycznymi ścieżkami hartowniczymi; wiąże się z koniecznością stosowania zabezpieczeń oraz środków ochrony osobistej z uwagi na szkodliwy wpływ promieniowania laserowego.

Hartowanie wiązką laserową nie powinno być traktowane jako alternatywa dla tradycyjnych metod hartowania lecz jako uzupełnienie metod obróbki cieplnej. Jest to nowoczesna technologia stwarzająca nowe możliwości konstrukcji i rozwoju. Jest ona w pełni dostosowana do wymagań współczesnej dynamicznej gospodarki.