

11. Warstwy powierzchniowe kształtowane z wykorzystaniem technologii laserowych

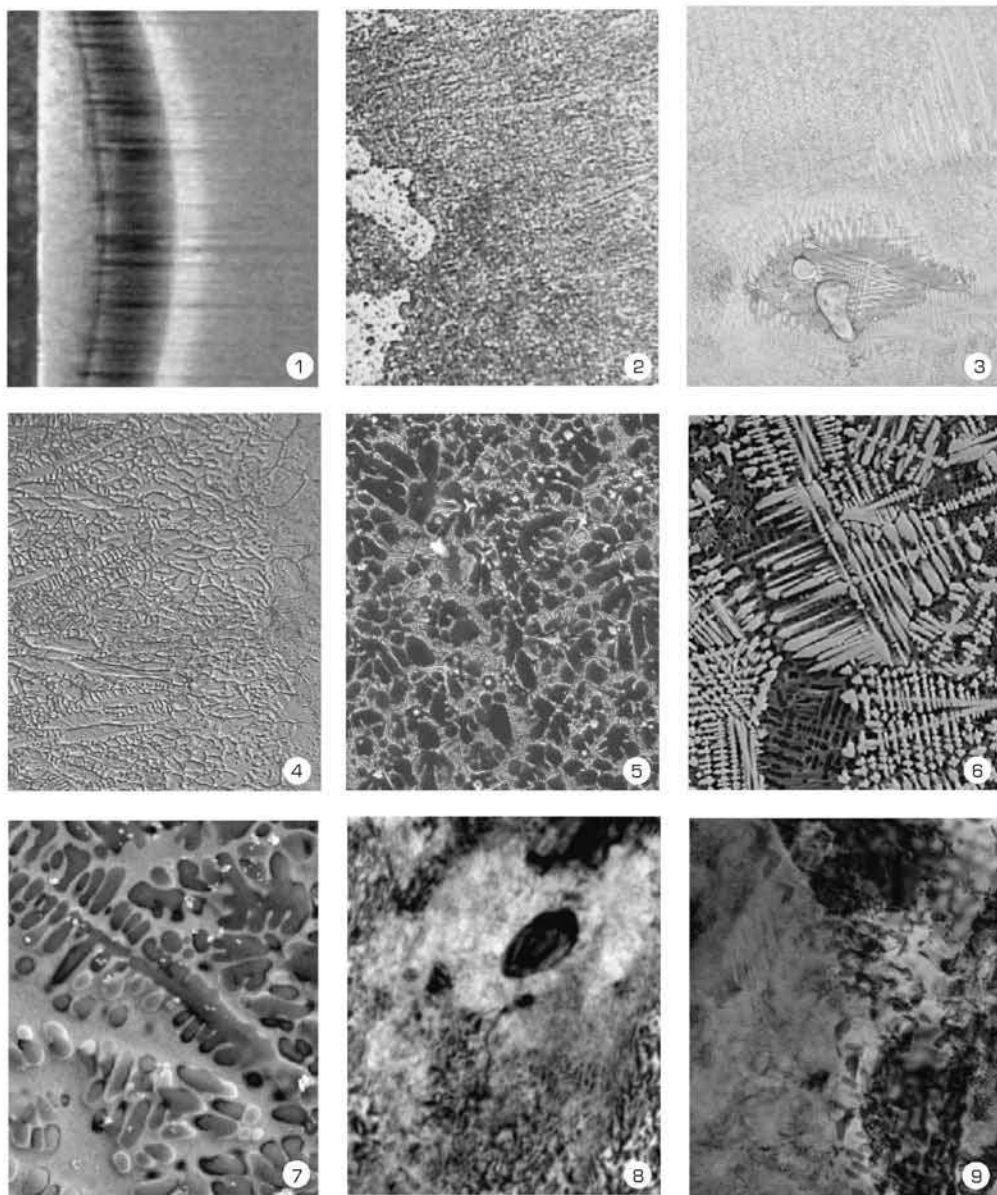
Technologie laserowe zyskały zastosowanie do wytwarzania warstw powierzchniowych różnymi metodami (porównaj rozdz. 3):

- **cieplnymi** (hartowanie, nadtapianie, natapianie),
- **cieplno-chemicznymi** (stopowanie),
- **cieplno-mechanicznymi** (utwardzanie).

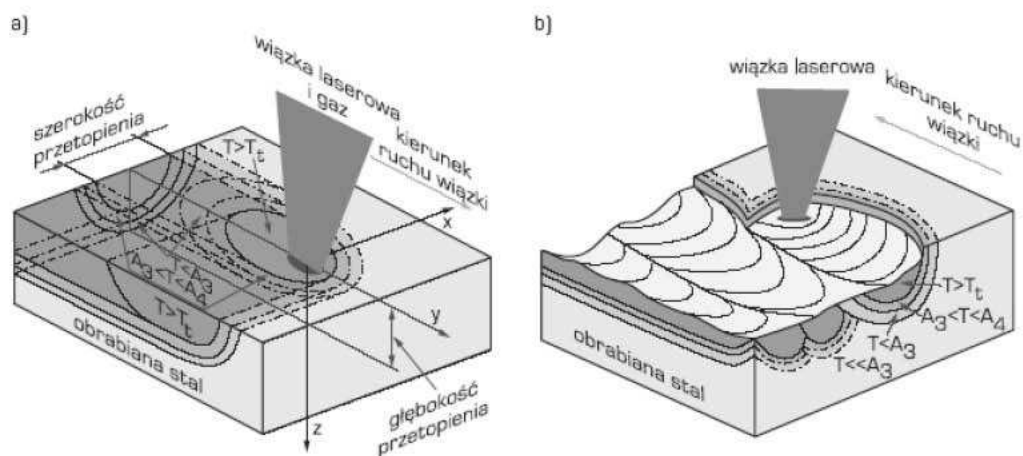
Wiązkę laserową wykorzystuje się do nagrzewania warstwy wierzchniej obrabianego materiału, w celu zapewnienia zmian struktury, umożliwiających uzyskanie wymaganych własności mechanicznych, fizycznych lub chemicznych, a często gwarantujących również poprawę własności eksploatacyjnych obrabianego elementu.

Laserowa obróbka powierzchni materiałów należy do jednych z najbardziej awangardowych i efektywnych technologii inżynierii produkcji. Uzyskuje się w wyniku tego warstwy powierzchniowe o grubości od dziesiątych części milimetra do kilku milimetrów (plansza 4), które wykazują podwyższone własności użytkowe, wysoką twardość, oraz dużą odporność na zużycie ściernie i zmęczenie cieplne. Odpowiedni dobór warunków technologicznych obróbki laserowej umożliwia uzyskanie powierzchni o chropowatości, która nie wymaga zapewnienia dużych naddatków na obróbkę wykończającą. Zapewnia to znaczne oszczędności, gdyż można wykorzystać relatywnie tani materiał podłoża, a równocześnie uzyskać podwyższone własności eksploatacyjne powierzchni obrabianych elementów.

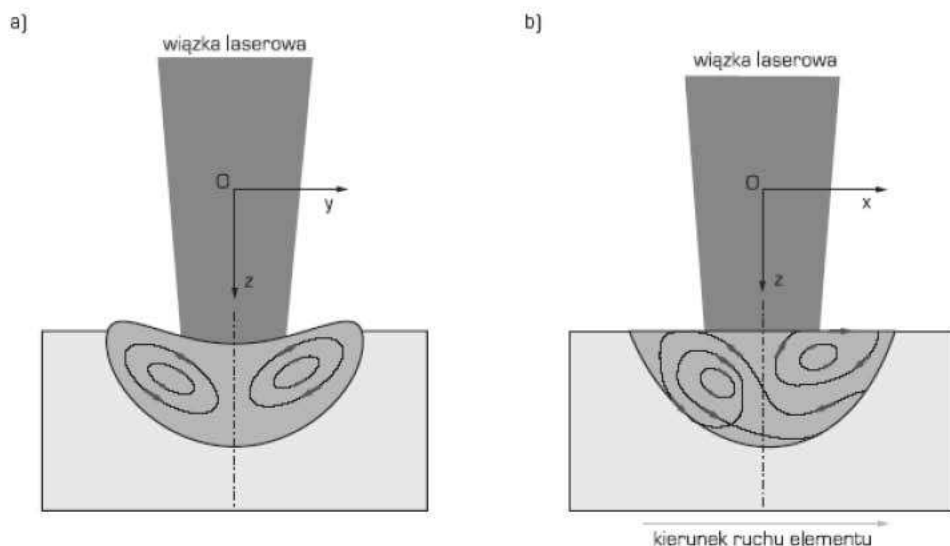
Oddziaływanie wiązki laserowej na powierzchnię obrabianego materiału powoduje absorpcję energii cieplnej i w wyniku tego przetapianie warstwy powierzchniowej i wnikanie w głąb materiału części zaabsorbowanej energii cieplnej i w następstwie tego duży gradient temperatury pomiędzy roztopioną warstwą materiału a nienadtapionym podłożem (rys. 31). W trakcie przetapiania, w wyniku konwekcji, w roztopionej warstwie materiału następuje jego mieszanie. Ruchy konwekcyjne materiału są wywołane różnicą temperatury między przetopioną powierzchnią i dnem obszaru przetopionego (rys. 32) oraz przez nadmuch gazu osłonowego i oddziaływanie wiązki laserowej. Duży gradient temperatury wpływa na szybkie krzepnięcie przetopionego i wymieszanego materiału warstwy powierzchniowej. Uzyskuje się



Plansza 4. Struktura warstwy wierzchniej stali badana w mikroskopie świetlnym 1) X40CrMoV5-1 po przetapianiu, moc wiązki lasera 2,3 kW, pow. 15x; 2) 32CrMoV12-28 po stopowaniu węglikiem TaC, moc wiązki 1,6 kW, pow. 250x; 3) 55NiCrMoV7 po stopowaniu węglikiem WC, moc wiązki 2,3 kW, pow. 400x; badana w mikroskopie elektronowym skaningowym: 4) X40CrMoV5-1 po przetapianiu, moc wiązki 1,1 kW, pow. 400x; 5) 32CrMoV12-28 po stopowaniu węglikiem TiC, moc wiązki 2,0 kW, pow. 800x; 6) 32CrMoV12-28 po stopowaniu węglikiem WC, moc wiązki 2,0 kW, pow. 800x; 7) X38CrMoV5-3 po stopowaniu węglikiem TiC, moc wiązki 1,6 kW, pow. 1600x; badana w mikroskopie elektronowym transmisyjnym: 8) X40CrMoV5-1 po stopowaniu węglikiem NbC, moc wiązki 1,6 kW, pow. 90000x; 9) X40CrMoV5-1 po stopowaniu węglikiem WC, moc wiązki 1,3 kW, pow. 50000x



Rysunek 31. Schematy nadtopiania laserowego stali: a) przy grzaniu ciągłym, b) przy grzaniu impulsowym; T_t – temperatura topnienia, A_3 i A_4 – temperatury przemian według wykresów równowagi stopów żelazo-węgiel, T – temperatura nagrzewanego przedmiotu (opracowano według A. Klimpla)



Rysunek 32. Schemat ruchów konwekcyjnych w jeziorze laserowym: a) w przekroju prostopadłym zOy do kierunku ruchu próbki (lub wiązki), b) w przekroju równoległym zOx do kierunku ruchu próbki (lub wiązki) (opracowano według J. Kusińskiego)

w wyniku tego warstwy powierzchniowe o grubości od dziesiątych części milimetra do kilku milimetrów, które wykazują podwyższone własności użytkowe, wysoką twardość, oraz dużą

odporność na zużycie ściernie i zmęczenie cieplne. Odpowiedni dobór warunków technologicznych obróbki laserowej umożliwia uzyskanie powierzchni o chropowatości, która nie wymaga zapewnienia dużych nadadatków na obróbkę wykończającą. Zapewnia to znaczne oszczędności, gdyż można wykorzystać relatywnie tani materiał podłoża, a równocześnie uzyskać podwyższone własności eksploatacyjne powierzchni obrabianych elementów [76, 77, 86, 87].

Przetapianiu laserowemu warstwy powierzchniowej towarzyszy powstawanie plazmy i parowanie materiału. Plazma ekranuje powierzchnię przed dalszym nagrzewaniem laserowym, aktywnie oddziałując równocześnie na powierzchnię jeziora ciekłego materiału przez zwiększanie ciśnienia i mieszanie roztopionego materiału. W miejscu wnikania wiązki laserowej, w jeziorce powstaje lejkowate zagłębienie, na którego powierzchnię działa ciśnienie hydrostatyczne cieczy od strony roztopionego materiału oraz ciśnienie par od strony wiązki. Chwiejna równowaga między tymi oddziaływaniami jest nieustannie zaburzana, między innymi przez względny ruch obrabianego elementu i wiązki laserowej. W wyniku tego następuje ruch względny zagłębienia w stronę nieroztopionego materiału, czyli przeciwnie do ruchu elementu względem wiązki. Ciśnienie par powoduje wypełnienie zagłębienia po jego przesunięciu się. Procesowi towarzyszy jednak powstanie charakterystycznej wypływki na obrzeżu przetopienia (rys. 32). Na powierzchni przetopionego materiału występuje więc pofalowanie, podobne do występujących na spoinach spawalniczych. Wymieniony efekt może być osłabiony przez zdmuchiwanie plazmy przez gaz obojętny, korzystnie przy powtórным skierowaniu odbitego promieniowania laserowego pierwotnego do strefy obróbki przez układ zwierciadeł płaskich lub zwierciadlaną czaszę. Gaz ochronny równocześnie zabezpiecza elementy optyczne głowicy lasera przed osiadaniami na nich gazów, par i cząstek stałych powstających w czasie obróbki [78].

Wśród technologii laserowych zapewniających wymagane własności powierzchni materiałów, można wyróżnić:

- **przetapianie,**
- **stopowanie,**
- **natapianie.**

W zależności od efektów uzyskiwanych w wyniku przetapiania i krzepnięcia, **przetapianie laserowe** można podzielić na:

- hartowanie przetopieniowe,

- szklwienie,
- zagęszczanie oraz
- wygładzanie.

W zależności od zastosowanej energii wiązki laserowej oraz prędkości skanowania można wyróżnić [61]:

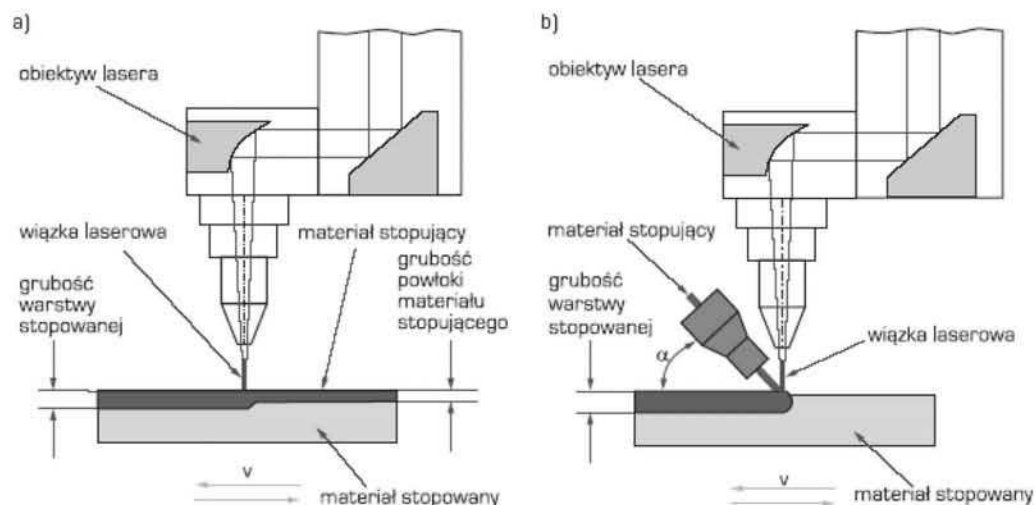
- podtapianie,
- przetapianie,
- intensywne przetapianie,
- bardzo intensywne przetapianie.

Hartowanie przetopieniowe powoduje rozdrobnienie struktury materiału wyjściowego. W warstwie powierzchniowej o grubości kilku mikrometrów, po hartowaniu przetopieniowym wyróżnia się kilka stref. Strefa powierzchniowa składa się głównie z tlenków metali i faz utworzonych w wyniku oddziaływania chemicznego i cieplnego stali oraz rozpuszczonych w niej gazów i składników powłoki absorpcyjnej z odpowiednią atmosferą oraz wiązką laserową. W kolejnej strefie, o morfologii dendrytycznej i strukturze martenzytycznej uzyskanej po zahartowaniu ze stanu ciekłego, węgliki zawarte w stali uległy całkowitemu lub częściowemu rozpuszczeniu w osnowie, w wyniku działania wiązki laserowej. Głębiej jest położona strefa podpowierzchniowa zahartowana ze stanu stałego o strukturze niejednorodnej, z martenzytem, austenitem szczątkowym i węglkami w pobliżu strefy przetopionej, oraz z martenzytem i ferrytem w stalach podeutektoidalnych lub cementytem w stalach nadeutektoidalnych w pobliżu rdzenia. Listwy martenzytu w tej strefie są 1,5÷2-krotnie mniejsze niż po hartowaniu konwencjonalnym. Najgłębszą jest strefa przyrdzeniowa, zwana również przejściową, o strukturze martenzytu odpuszczonego [61, 62].

Przetopienie warstwy powierzchniowej materiału powoduje rozdrobnienie struktury oraz częściowe lub całkowite rozpuszczenie występujących w niej wydzielen lub wtrąceń, w tym węglików, grafitu lub tlenków. W wyniku szybkiej krystalizacji przy szybkości chłodzenia do ok. 100°C/s, fazy te nie wydzielają się ponownie lub mają znacznie drobniejszą postać, a roztwór stały jest silnie przesycony pierwiastkami pochodzącymi z rozpuszczonych faz, czemu towarzyszy zwykle oczyszczenie granic ziarn, powodujące zwiększenie odporności korozyjnej.

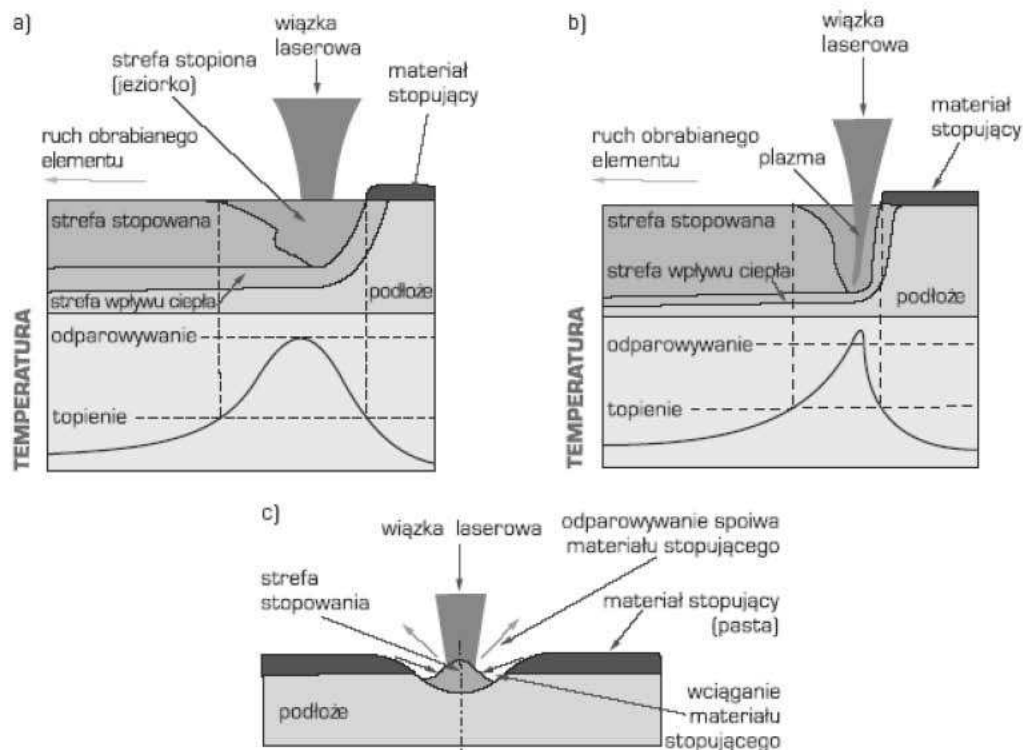
Laserowe hartowanie przetopieniowe wpływa na polepszenie własności eksploatacyjnych, trybologicznych, zmęczeniowych i antykorozyjnych oraz pogorszenie chropowatości powierzchni.

Stopowanie laserowe polega na jednoczesnym topieniu materiału stopującego i podłoża, przez wiązkę laserową, przy intensywnym mieszaniu ich w ciekłym jeziorce. W zależności od sposobu wprowadzania dodatku stopującego do jeziora rozróżnia się przetapianie i wtapianie (rys. 33).



Rysunek 33. Schemat stopowania laserowego: a) przetapianie, b) wtapianie (opracowano według J. Kusińskiego)

Proces stopowania polega na naniesieniu na podłoże materiału stopującego i na następnym przetopieniu go wraz z warstwą wierzchnią materiału podłoża (rys. 34). Materiał stopujący nakłada się na materiał podłoża metodami malowania, pokrywania przyklejonymi pastami lub proszkami (ze sproszkowanymi żelazostopami metali nasycających, węglnikami boru, wolframu, tytanu), natryskiwania cieplnego (plazmowego, płomieniowego, detonacyjnego), naporowywania, osadzania elektrolitycznego, natryskiwania zawiesinami, nanoszenia elektroiskrowego, nakładania cienkich folii, płytek, prętów lub drutów. Przez przewodzenie ciepła z kąpieli, stopieniu ulega również cienka warstwa materiału w stanie stałym przylegająca do materiału jeziora, w wyniku czego na granicy faz stałej i ciekłej występuje po ochłodzeniu bardzo cienka strefa dyfuzyjna, o grubości 10 μm , chociaż w niektórych przypadkach składniki stopujące dyfundują nawet na głębokość 200÷300 μm . Stopowanie realizuje się przy jednym lub kilku przejściach wiązki laserowej [1, 78].



Rysunek 34. Schemat przebiegu stopowania laserowego: a) bez powstawania plazmy, b) z powstawaniem plazmy, c) kształtowanie ścieżki laserowej w postaci wału (opracowano według J. Kusińskiego)

Materiał w warstwie stopowanej po zakończeniu oddziaływania wiązki laserowej krzepnie, a materiał podłoża w jego sąsiedztwie ulega zahartowaniu. Struktura tej warstwy, jej skład chemiczny i własności fizykochemiczne różnią się od podłoża i od materiału stopującego. Grubość warstw uzyskanych przez stopowanie przetopieniowe wynosi $0,3 \div 0,4$ mm przy nagrzewaniu impulsowym lub $0,3 \div 1,0$ mm przy nagrzewaniu ciągłym.

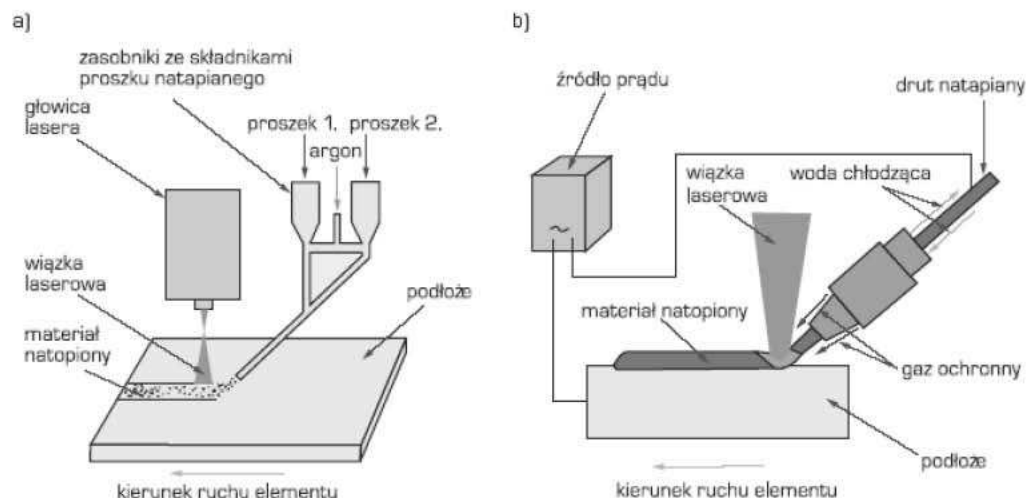
Stopowanie laserowe może dotyczyć wprowadzenia w warstwę wierzchnią niemetali, węgla, azotu, krzemu i boru. Najczęściej stopowanie laserowe polega jednak na wzbogacaniu warstwy wierzchniej materiałów w metale, takie jak: Co, Cr, Sn, Mn, Nb, Ni, Mo, W, Ta, V lub ich niektóre stopy, np. Cr-Mo-W, Ni-Nb. Stale maszynowe najczęściej stopuje się przetopieniowo węglem, chromem, niklem, molibdenem, borem naniesionym elektrolitycznie lub w postaci pasty, sproszkowanymi węglnikami WC, TiC lub mieszaninami WC-Co, a stale narzędziowe – różnymi mieszaninami węglików, wolframem, węglikiem wolframu i węglikiem

tytanu, borkami chromu lub wanadu, węglnikami wanadu, węglnikami boru lub ich mieszaninami z chromem oraz mieszaninami Mo-Cr-B-Si-Ni [63-66] (plansza 4).

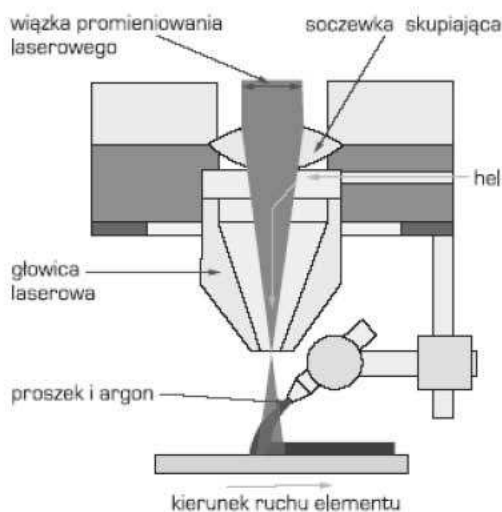
Proces **natapiania laserowego**, zwanego również platerowaniem lub napawaniem laserowym, polega na stopieniu grubej warstwy materiału natapianego i na podtopieniu bardzo cienkiej warstwy materiału podłoża wraz z przetopieniem naniesionego materiału powłoki, natapianego dla uzyskania powłoki bardziej odpornej na erozję, korozję lub ścieranie niż podłoże. Grubość warstw natapianych może wynosić kilka milimetrów i jest większa niż warstw stopowanych [62].

Materiał natapiany może być rozpuszczalny lub nierozpuszczalny w materiale podłoża. Wytworzona warstwa przejściowa pomiędzy podłożem a warstwą natapianą jest silnie związana z podłożem. Przetapianie od góry jest niekorzystne, sprzyjając powstawaniu pęcherzy i niedotopień w pobliżu podłoża, czemu sprzyja również spoiwo warstwy natapianej (żywica epoksydowa i inne materiały polimerowe, szkło wodne, roztwór boraksu z acetonem, alkohol izopropylowy, alkoholowy roztwór kalafonii, kleje nitrocelulozowe, krzemianowe i kauczukowe), odparowujące w trakcie nagrzewania wiązką lasera i okresowo ekranujące jeziorko roztopionego materiału. Zbyt głębokie przetopienie podłoża następuje przy zbyt dużej energii wiązki lasera, natomiast jeżeli jest za niskie – warstwa natopiona ma postać kroplową. Zwykle następuje także wypalanie spoiwa na bokach ściegu, co wymaga nakładaniu kilku ściegów, a czego można uniknąć w przypadku powłok w postaci proszku, pręta lub taśmy. W procesie natapiania iniekcyjnego, proszek może być nasypywany bezwładnościowo lub wibracyjnie albo dostarczany w strumieniu gazu obojętnego (np. azotu, helu, argonu) lub także powietrza. W przypadku użycia gazu aktywnego do podawania proszku następuje reakcja egzotermiczna intensyfikująca proces. W przypadku natapiania napawaniowego w sposób ciągły jest podawany pręt, na podłoże zimne albo wstępnie lub równocześnie podgrzewane, np. oporowo (rys. 35) lub lukowo. Ponieważ w tych przypadkach proszek lub ich mieszanina są wdmuchiwane w strefę wiązki laserowej (rys. 35), a zatem ulegają przetopieniu i w tym stanie padają na podłoże, od dołu tworząc na jego powierzchni krzepnącą warstwę natopioną. Głowica lasera jest sprzężona z dyszą podającą proszek zgodnie lub przeciwnie do ruchu obrabianego elementu [2, 3, 77] (rys. 36).

Natapianie laserowe powoduje rozdrobnienie struktury oraz rozpuszczenie faz węglkowych, w wyniku czego po ochłodzeniu powstaje roztwór przesycony pierwiastkami stopowymi. Zapewnia to polepszenie własności eksploatacyjnych i zwiększenie odporności na ścieranie



Rysunek 35. Schemat natapiania: a) proszkowego dwuskładnikowego, b) drutowego (opracowano według J. Kusińskiego)



Rysunek 36. Schemat głowicy laserowej sprzężonej z urządzeniem podającym proszek (opracowano według J. Kusińskiego)

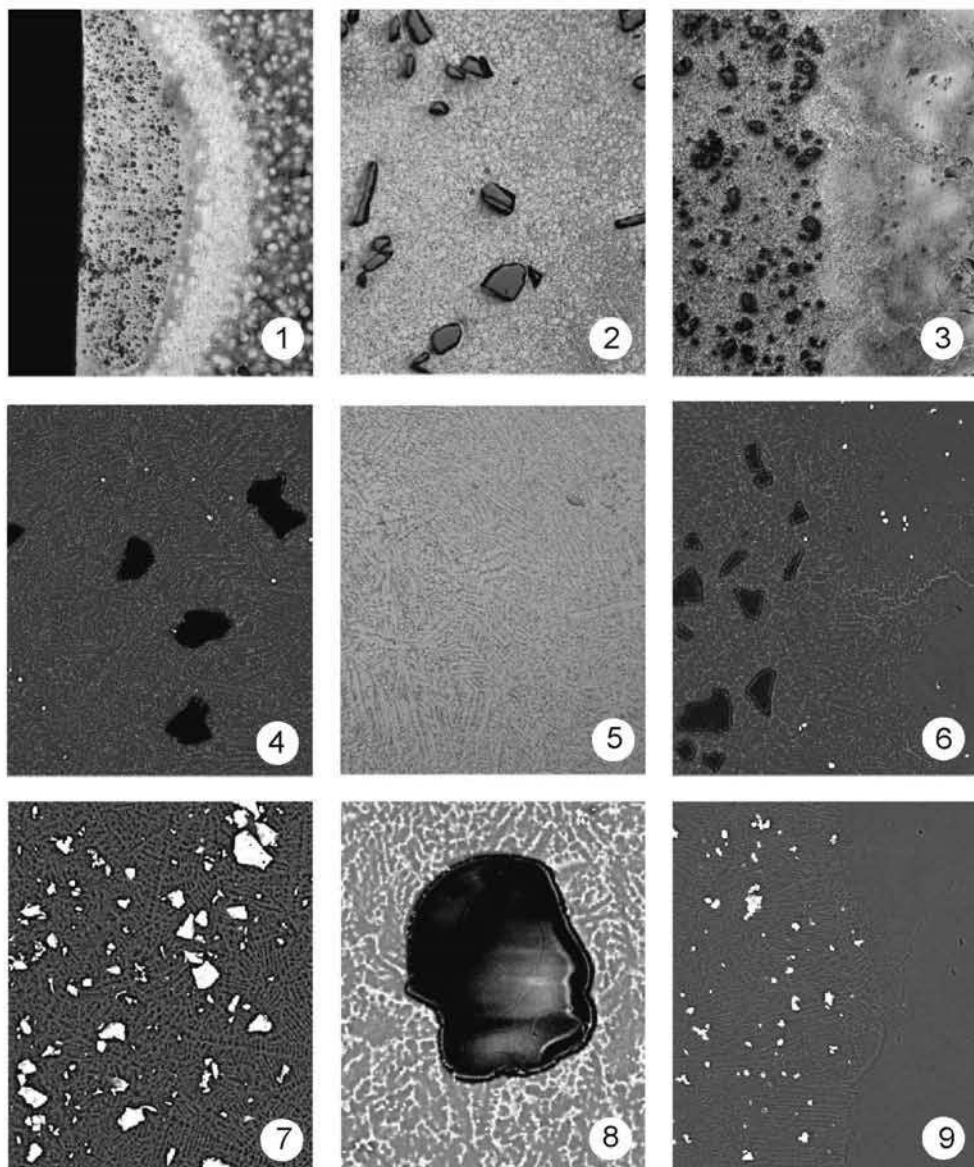
oraz poprawę własności w podwyższonej temperaturze, chociaż zwiększa się podatność na pękanie natopionych warstw. Te własności warstw natapianych laserowo decydują, że stosuje się je do materiałów odpornych na korozję, materiałów narzędziowych, odpornych na ścieranie, oraz materiałów żaroodpornych i odpornych na zużycie w wysokiej temperaturze.

Stal natapia się aluminium, stopami kobaltu lub tytanu, mieszaninami: C-Cr-Mn, C-Cr-W, Cr-B-Ni, Cr-Ni, Cr-Ni-B-Fe z domieszką C i Si, Fe-Cr-Mn-C, Mo-Cr-CrC-Ni-Si, Mo-Ni, TiC-Al₂O₃-Al, TiC-Al₂O₃-B₄C-Al, stellitami, węglnikami WC, TiC, B₄C, SiC, azotkami, w tym BN, tlenkami chromu i SiO₂. Do natapiania stopów stosuje się stopy niklu, do natapiania aluminium i miedzi wykorzystuje się mieszaniny ZrO₂-CaO lub ZrO₂-Y₂O₃.

Stopowanie, wtapianie i napawanie laserowe zapewniają najwyższej jakości **warstwy wierzchnie** o grubości 0,1÷1,5 mm i bardzo wysokiej jakości połączenia z podłożem możliwe do wykorzystania dla sporej części narzędzi wytwarzanych z tolerancją poniżej 0,1÷0,5 mm, gdy kryterium wymiarowe trwałości nie przekracza 0,5÷1,0 mm. Główną trudnością przy laserowym wytwarzaniu warstw wierzchnich kompozytowych cermetalowych o dużej twardości jest skłonność do pęknięcia w obszarze warstw wierzchnich i w strefie wpływu ciepła podłoża, ze względu na diametralnie różne własności, strukturę i skład chemiczny [30, 31, 67-71]. Skłonność do pęknięcia warstw wierzchnich można ograniczyć lub całkowicie wyeliminować dzięki zastosowaniu gradientowego udziału twardych faz ceramicznych lub gradientowego stężenia składnika stopującego w warstwie wierzchniej, jak również przez zastosowanie warstwy pośredniej pomiędzy warstwą wierzchnią a podłożem, co zapewnia utworzenie strefy gradientowej i poprawne połączenie metalurgiczne [31, 67, 72]. **Warstwy gradientowe wytwarzane techniką laserową**, oprócz bardzo dobrego połączenia metalurgicznego z podłożem, zapewniają wysoką odporność korozyjną, odporność na zużycie, wysoką żaroodporność i twardość, jak i ciągliwość, plastyczność i wytrzymałość zmęczeniową, trudne lub wręcz niemożliwe do uzyskania innymi technologiami [29, 31, 68, 73-75]. Światowy przemysł już obecnie w szerokim zakresie wykorzystuje technologie laserowe, a najszerze zastosowanie przemysłowe w procesach laserowej obróbki materiałów mają obecnie lasery stałe z elementem czynnym krystalicznym – Nd:YAG oraz lasery gazowe – CO₂ [76-78]. Badania prowadzone obecnie w kraju i zagranicą przez specjalistów w zakresie technologii laserowych [79-98], dotyczą klasycznych technologii laserowej obróbki powierzchniowej, stopowania i napawania laserowego, głównie stali szybko tnących oraz stali maszynowych przy zastosowaniu tych typów laserów. Dynamiczny rozwój technik oraz urządzeń laserowych spowodował wprowadzenie do przemysłu światowego laserów diodowych dużej mocy HPDL, co stwarza możliwości dalszego rozwoju oraz znacznego rozszerzenia zastosowania technologii obróbki powierzchniowej, jak i stopowania oraz napawania laserowego [61, 63-65]. Zastosowanie metodyki napawania laserowego warstw gradientowych stanowi nowoczesne podejście do

problemu dodatkowego zwiększenia twardości oraz odporności na zużycie ściernie nowych narzędzi przy jednoczesnym zmniejszeniu kosztów produkcji. Technologia napawania laserowego z regulacją składu chemicznego napoiiny w czasie procesu napawania oraz sposób laserowego wytwarzania warstw gradientowych pozwalają na ich napawanie warstw z bardzo dużą dokładnością regulacji gradientu stężenia składników ceramicznych lub metalowych stopujących warstwę gradientową. Gradient stężenia składników stopujących regulowany może być jednocześnie trzema parametrami: natężeniem podawania proszku ceramicznego lub metalowego, prędkością podawania drutu tworzącego osnowę metalową napoiiny oraz liczbą i grubością poszczególnych ściągów napoiiny. Bardzo duża gęstość mocy wiązki laserowej, dochodząca w normalnych warunkach atmosferycznych do 10^7 W/cm^2 , sprawia, że oddziaływanie cieplne na napawany przedmiot jest bardzo ograniczone, powodując minimalne naprężenia i odkształcenia spawalnicze. Regulowana z dużą dokładnością głębokość nadtopienia metalu podłoża zapewnia minimalny jego udział w napoiinie. Można uzyskać warstwy metalowe np. o budowie nanokrystalicznej, warstwy zawierające w miękkiej osnowie metalowej twarde fazy międzymetaliczne, warstwy cermetalowe i ceramiczne o bardzo wysokiej twardości, odporności na korozję, żaroodporności i odporności na zużycie ściernie. Jest to szczególnie cecha procesu napawania laserowego proszkowego, niewystępująca w innych procesach napawania [77-79].

Obróbka laserowa znajduje coraz częściej zastosowanie do **obróbki powierzchniowej stopów metali lekkich** (plansza 5). Stan wiedzy dotyczący stopów lekkich magnezu i aluminium wskazuje, iż dotychczas nie wykorzystano w pełni wszystkich możliwości technologicznych oraz związanych z optymalizacją składu chemicznego tych wieloskładnikowych stopów. Stopy metali lekkich cieszą się ostatnio coraz większym zainteresowaniem wytwórców i projektantów, co czyni je również atrakcyjnymi badawczo [99-102]. Wymaga się od nich coraz wyższych wytrzymałości oraz odporności na korozję, gdyż ze względu na małą gęstość są, coraz częściej stosowane. Ciągłe pojawiają się nowe kierunki badań stopów metali lekkich. Przeprowadzane badania zmierzają stale do poprawy zespołu własności fizycznych i mechanicznych reprezentowanych przez stopy wieloskładnikowe magnezu o małej gęstości, co stanowi zainteresowanie wielu gałęzi przemysłu i gospodarki (w tym m.in. lotnictwo, motoryzacja, sport, urządzenia biurowe, przemysł energetyczny, elektroniczny, chemiczny, nuklearny i inne), a zwłaszcza poprawę poszczególnych własności tzw. właściwych (czyli stosunku wartości danej wielkości do gęstości), w tym wytrzymałości właściwej. Oprócz



Plansza 5. Struktura 1) warstwy wierzchniej stopu magnezu MCMgAl9Zn1 – po wtapianiu proszku WC, moc wiązki lasera 2,0 kW, pow. 20x; 2) strefy centralnej warstwy wierzchniej stopu MCMgAl6Zn1 – SiC, 2,0 kW, pow. 150x; 3) granicy pomiędzy strefą przetopienia i strefą wpływu ciepła warstwy wierzchniej stopu MCMgAl12Zn1 – TiC, 1,6 kW, pow. 75x; 4) strefy centralnej przetopienia warstwy wierzchniej stopu MCMgAl9Zn1 – Al_2O_3 , 1,6 kW, pow. 450x; 5) strefy centralnej warstwy wierzchniej stopu MCMgAl6Zn1 po przetapianiu laserowym, 2,0 kW, pow. 370x; 6) granicy strefy przetopionej warstwy wierzchniej stopu MCMgAl9Zn1 – SiC, 2,0 kW, pow. 450x; 7) strefy centralnej przetopienia warstwy wierzchniej stopu MCMgAl3Zn1 – TiC, 1,2 kW, pow. 720x; 8) strefy przetopienia w warstwie wierzchniej stopu MCMgAl12Zn1 – Al_2O_3 , 2,0 kW, pow. 1450x; 9) strefy granicznej pomiędzy strefą przetopienia i podłożem stopu MCMgAl6Zn1 – WC, 2,0 kW, pow. 370x

berylu, który daje w tym zakresie największe możliwości, jednak przy dużych kosztach i ograniczonej dostępności, oraz generalnie, w innym zakresie zastosowań, stopy magnezu o poprawnie dobranym składzie chemicznym oraz o kompleksowo dobranej technologii zapewniającej optymalizację warunków technologicznych ze względu na możliwie maksymalną wytrzymałość właściwą, przy akceptowalnym poziomie pozostałych własności, w tym ciągliwych, oraz przy odpowiednio wysokim poziomie odporności na korozję, a także przy relatywnie niskiej cenie, należą do materiałów metalowych najbardziej atrakcyjnych aplikacyjnie. Do elementów zapewniających poprawę zespołu własności wieloskładnikowych odlewniczych stopów magnezu należy optymalizacja warunków obróbki powierzchni przez lokalne (powierzchniowe) wykorzystanie możliwości analogicznych do technologii RSP (ang.: *Rapid Solidification Processing*), polegających na utworzeniu na powierzchni produktu warstwy o grubości do ok. 0,5 mm przetapianej laserem diodowym o dużej mocy (HPDL) i szybkiej mikrokryształizacji, lub nawet nanokryształizacji, w tych warunkach odprowadzania ciepła z jeziora przez masywny element o bardzo dużej pojemności cieplnej i bardzo dobrym przewodnictwie cieplnym, co zapewnia szybkość chłodzenia 10^5 – 10^6 K/s i w efekcie znaczne, nawet o 70%, podwyższenie własności mechanicznych tak obrobionego obszaru materiału oraz znaczne, nawet do 100%, podwyższenie jego odporności na korozję, a także najpewniej polepszenie własności trybologicznych. Uzyskany w ten sposób element wykazuje własności „quasi-gradientowe”, gdyż przy stosunkowo mniejszych własnościach mechanicznych rdzenia produktu oraz korzystnych własnościach ciągliwych przeważającej części objętości danego elementu, uzyskuje bardzo wysokie własności trybologiczne, odporność na korozję oraz wysokie własności mechaniczne na powierzchni, zapewniając w ten sposób najlepsze własności eksploatacyjne, trwałość i niezawodność całego produktu. Obróbka laserowa tych stopów umożliwia również optymalizację składu fazowego strefy powierzchniowej przez wprowadzenie do niej dyspersyjnych cząstek węglików lub cząstek ceramicznych o odpowiednio dobranej ziarnistości, w wyniku stopowania, a właściwie wtapiania z użyciem lasera diodowego o dużej mocy HPDL, co zapewnia najwyższą możliwą odporność na ścieranie i na erozję warstwy wierzchniej produktów lub ich elementów wykonanych np. ze stopów wieloskładnikowych Mg-Al-Zn (plansza 5), w których zapewniono najkorzystniejsze własności metodami optymalizacji składu chemicznego oraz warunków obróbki cieplnej. Optymalizacja składu fazowego oraz technologii musi jednak w tym przypadku uwzględniać fakt, że odporność korozyjna oraz własności ciągliwe mogą ulec pogorszeniu w stosunku do

uzyskanych w wyniku przetapiania laserowego w lokalnym procesie „quasi-RSP”. Stąd zarówno rodzaj – skład chemiczny i fazowy, udział, jak i wielkość wtapianych cząstek muszą być odpowiednio dobrane eksperymentalnie. Zapewnia to na powierzchni elementów odlewanych ze stopów Mg-Al-Zn z innymi dodatkami, własności właściwe dla materiałów kompozytowych MMCs o osnowie stopów magnezu [103, 104].

Kompleksowe połączenie wymienionych elementów dotyczących składu chemicznego i fazowego rdzenia i osnowy badanych stopów wieloskładnikowych Mg-Al-Zn z innymi dodatkami, o małej gęstości oraz o składzie fazowym, a zatem o własnościach mechanicznych, ciągliwości i własnościach fizycznych regulowanych przez obróbkę cieplną w dosyć szerokim zakresie, w produktach o quasi-gradientowych własnościach, z możliwościami kształtowania struktury metalicznej osnowy powierzchni produktu przez nanokrystalizację lub mikrokrytalizację w wyniku przetapiania laserowego w procesie „mikro-quasi-RSP”, zapewniających znaczne podwyższenie własności wytrzymałościowych i odporności na korozję na powierzchni oraz możliwościami kształtowania składu fazowego powierzchni w wyniku wtapienia odpowiednio dobranych cząstek węglików lub cząstek ceramicznych o kontrolowanej wielkości i ziarnistości oraz wytworzenia w ten sposób na powierzchni warstwy mikrokompozytu, co zapewnia znaczne podwyższenie odporności na zużycie ściernie i erozję produktu, wymaga jednak uwagi ze względu na spodziewane relatywne, lokalne pogorszenie własności ciągliwych metalicznej osnowy oraz zwiększenie chropowatości powierzchni, co wymaga z kolei z jednej strony – rozsądnego ograniczenia udziału cząstek stopujących w wyniku optymalizacji warunków technologicznych laserowego stopowania, a z drugiej strony – wprowadzenia końcowej operacji szlifowania, dla zapewnienia wymaganej gładkości powierzchni oraz zapewnienia wymaganych tolerancji wymiarowych produktu, przy uwzględnieniu wskaźników kosztowych, które są korzystne, ze względu na znaczne wydłużenie trwałości tak wykonanych produktów lub ich elementów [105-107].

Obróbka laserowa, wprawdzie z wykorzystaniem laserów typu Nd:YAG lub innych małej mocy, jest wykorzystywana do złobienia rowków na powierzchni płytek krzemu polikrystalicznego, wykorzystywanych następnie do celów fotowoltaicznych. Współczynnik odbicia promieniowania elektromagnetycznego $R(\lambda)$ dla polerowanej powierzchni krzemu krystalicznego wynosi 35÷50%, w zależności od długości fali i może być zredukowany właśnie przez teksturowanie powierzchni, polegające na odpowiednim rozwinięciu powierzchni płytki krzemu, oprócz obróbki laserowej metodami mechanicznymi lub chemicznymi albo hybrydowymi,

np. przez wykonanie odpowiednich rowków lub zagłębień w układzie równoległym lub siatkowym. Dzięki teksturowaniu powierzchni ogniwa fotowoltaicznego, foton odbity od powierzchni może po raz wtóry być zaabsorbowany przez płytkę krzemową. W przypadku krzemu monokrystalicznego, konwencjonalną metodą teksturowania powierzchni jest anizotropowe trawienie w roztworach alkalicznych, np. KOH lub NaOH, z różną szybkością w różnych kierunkach krystalograficznych, co daje spore możliwości jego przestrzennego kształtowania. Teksturowanie laserowe również wymaga końcowego trawienia w roztworach alkalicznych. Oprócz laserowego i alkalicznych metod teksturowania krzemu polikrystalicznego stosowane jest także trawienie w roztworach kwasowych $\text{HNO}_3\text{:HF}$, $\text{HNO}_3\text{:HF:CH}_3\text{COOH}$, w wyniku którego otrzymuje się warstwy porowate, zaokrąglone kształty, w formie „plastra miodu”, teksturowanie mechaniczne, zazwyczaj wykonywane piłą diamentową z usunięciem uszkodzeń powierzchni przez trawienie w roztworach alkalicznych oraz reaktywne trawienie jonami RIE (ang.: *Reactive Ion Etching*) wykonywane w plazmie, zapewniające teksturę w postaci „igieł”. Współczynnik odbicia promieniowania elektromagnetycznego $R(\lambda)$ powierzchni płytki krzemowej może być także zredukowany przez nanoszenie warstwy antyrefleksyjnej (ARC), w tym $\text{SiN}_x\text{:H}$ metodą PECVD chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganej plazmą (ang.: *Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*), o współczynniku załamania światła $n = 1,9\div 2,6$ oraz pełniącego dodatkowo rolę pasywatora powierzchni materiału, jednak kosztownego, lub między innymi TiO_2 ($n = 2,3\div 2,5$) nanoszonego metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej (ang.: *Chemical Vapour Deposition CVD*) oraz SiO_2 ($n = 1,46$) wytworzonego przez utlenianie termiczne, a najkorzystniej wielowarstwowych pokryw przeciwo odbiciowych, na przykład MgF_2 ($n_1 = 1,35\div 1,4$)/ ZnS ($n_2 = 2,25\div 2,35$) o największej redukcji współczynnika odbicia $R(\lambda)$ [108, 109].

Ogniwa fotowoltaiczne z krzemu monokrystalicznego mają bardzo dobre własności i wysoką sprawność, jednak ich koszty wytwarzania są relatywnie wysokie. Ogniwa fotowoltaiczne wytworzone z krzemu polikrystalicznego o mniejszej sprawności są znacznie tańsze, z uwagi na mniejszą energochłonność procesów wytwarzania oraz niższe koszty oprzyrządowania technologicznego. W Niemczech zainstalowano łącznie urządzenia fotowoltaiczne o mocy 600 MW, co czyni je niekwestionowanym liderem w tym zakresie w Europie i na Świecie. Całkowita moc urządzeń fotowoltaicznych zainstalowanych w Europie wynosi łącznie ok. 1795 MW. Szacuje się, że poziom energii 3000 MW zainstalowanych

urządzeń fotowoltaicznych zaplanowany przez Unię Europejską na 2010 rok zostanie przekroczony dwukrotnie, a niektóre prognozy przewidują, że do 2040 roku technologia ta może zapewnić aż 25% energii elektrycznej na Świecie, a na koniec obecnego stulecia może osiągnąć nawet 50%. W świetle tych informacji obróbka powierzchniowa krzemu, zwłaszcza polikrystalicznego i to zwłaszcza z wykorzystaniem teksturowania laserowego nabiera szczególnego znaczenia i z pewnością, wobec opanowania podstaw naukowych tej technologii właśnie w Polsce, stanowi ważne wyzwanie dla krajowego przemysłu [108-110].