

Zastosowanie powłok tytanowych uzyskanych w technologiach przyrostowych z wykorzystaniem procesu natryskiwania zimnym gazem

Use of titanium coatings obtained in incremental technologies using a cold gas spraying process

DOMINIKA SOBOŃ
WOJCIECH ŻÓRAWSKI
MEDARD MAKRENEK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.12.206>

W artykule przedstawiono natryskane zimnym gazem powłoki z tytanu oraz ze stopu tytanu Ti-6Al-4V, wytworzone na Politechnice Świętokrzyskiej z zastosowaniem wysokociśnieniowego systemu Impact Innovations 5/8. Wysoka energia kinetyczna proszku tytanowego powoduje jego znaczne odkształcenie po uderzeniu w podłoże, dzięki czemu możliwe jest formowanie powłoki. Charakteryzuje się ona niewielką porowatością i znacznie lepszymi właściwościami mechanicznymi w porównaniu z materiałem rodzimym, na którym została naniesiona. Dodatkowo podczas procesu natryskiwania nie zachodzą zmiany fazowe, a powłoka nie zawiera żadnych tlenków. Podano przykłady zastosowania technologii natryskiwania zimnym gazem do regeneracji elementów w przemyśle lotniczym.

SŁOWA KLUCZOWE: natryskiwanie zimnym gazem, technologie przyrostowe, powłoki tytanowe

The article presents cold gas sprayed titanium and Ti-6Al-4V titanium alloys that were manufactured at the Kielce University of Technology using the high pressure Impact Innovations 5/8 system. They are characterized by a slight porosity and much better mechanical properties in relation to the native material on which they were sprayed. In addition, during the spraying process, there are no phase changes and the coating does not contain any oxides. Some examples of the application of cold gas spraying technology for the regeneration of components in the aviation industry are presented.

KEYWORDS: cold gas spraying, additive manufacturing, titanium coating

Procesy technologiczne służą do wytwarzania części maszyn, a także do poprawy ich właściwości mechanicznych. W tej dziedzinie są prowadzone badania nad innowacyjnymi rozwiązaniami. Opracowuje się technologie, pozwalające na modyfikowanie istniejących rozwiązań, oraz wprowadza nowe materiały.

Wśród technologii inżynierii powierzchni duży potencjał mają techniki natryskiwania cieplnego. To grupa procesów polegających na nanoszeniu na podłoże rozdrobnionego materiału, który tworzy powłokę. Materiał powłokowy może mieć formę proszku, drutu lub pręta. Podczas natryskiwania podłoże materiału nie jest nadtapiane i nie zachodzą w nim żadne przemiany fazowe. Zasadniczą rolę w każdym z procesów natryskiwania cieplnego odgrywają dwa parametry: źródło ciepła oraz prędkość cząstek materiału tworzącego powłokę. W zależności o tych kryteriów wyróżnia się natryskiwanie cieplne: płomieniowe, łukowe, plazmowe, detonacyjne, laserowe, naddźwiękowe HVOF oraz natryskiwanie zimnym gazem. Powłoki wytworzone

tymi technikami na elementach maszyn gwarantują dużą odporność na zużycie i korozję.

Szerokie zastosowanie metod natryskiwania cieplnego jest efektem ciągłego rozwoju technologii oraz wykorzystania nowoczesnych materiałów [1, 2].

Dalej przedstawiono podstawy natryskiwania zimnym gazem, charakterystykę tytanu i stopu Ti-6Al-4V – jako materiału powłokowego – oraz przykłady zastosowania tej technologii do regeneracji elementów w sektorze lotniczym.

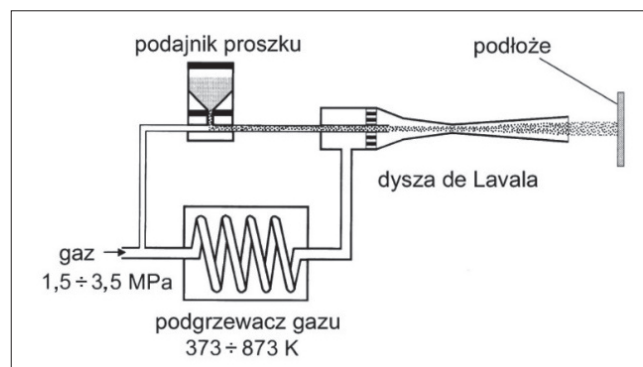
Podstawy procesu natryskiwania zimnym gazem

Technika natryskiwania zimnym gazem została opracowana w drugiej połowie lat 80. XX w. przez zespół prof. A. Papyrina w Instytucie Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej w Nowosybirsku. Jest to innowacyjna technika natryskiwania cieplnego, w której nie występuje niekorzystny wpływ temperatury na cząstki materiału powłokowego i podłoże – dzięki temu otrzymuje się powłoki o właściwościach nieosiągalnych w przypadku zastosowania konwencjonalnych metod natryskiwania cieplnego.

W procesie natryskiwania zimnym gazem osadzanie proszku odbywa się bez jego topienia, w wyniku odkształcania plastycznego jego cząsteczek uderzających z dużą prędkością [3]. W tej metodzie podgrzany pod wysokim ciśnieniem gaz wprowadza się do sekcji zbieżnej dyszy typu de Laval (dyszy zbieżno-rozbieżnej). Oddzielnym przewodem do dyszy dostarczany jest proszek o granulacji $5 \div 100 \mu\text{m}$ [4].

Schemat procesu natryskiwania zimnym gazem przedstawiono na rys. 1.

Właściwości proszku istotnie wpływają na właściwości powłok natryskiwanych na zimno oraz na jakość procesu osadzania. Podstawowym zagadnieniem związanym z natryskiwanym zimnym gazem jest określenie prędkości krytycznej V_{kr} dla określonego typu układu materiał powłokowy – podłoże.



Rys. 1. Schemat procesu natryskiwania zimnym gazem [6]

* Mgr inż. Dominika Soboń (dsobon@tu.kielce.pl), dr hab. inż. Wojciech Żórawski (ktrwz@tu.kielce.pl), dr Medard Makrenek (fizmm@tu.kielce.pl) – Katedra Inżynierii i Eksploatacji, Politechnika Świętokrzyska

W przypadku gdy prędkość cząstki jest za niska, cząstka ulega odbiciu od podłoża i nie tworzy powłoki. Jeżeli natomiast prędkość cząstki jest za wysoka, podłoże ulega procesowi erozji. Powłoka powstaje wtedy, gdy prędkości ziaren zbliżą się do V_{kr} – przy tej prędkości cząstki ulegają odkształceniu plastycznemu i przylegają do podłoża. W zależności od zastosowanego gazu i parametrów natryskiwania prędkość cząsteczek może wynosić 200÷1200 m/s [5].

Proces natryskiwania zimnym gazem pozwala na wytwarzanie gęstych powłok w szerokim zakresie grubości i z zachowaniem bardzo dobrych właściwości mechanicznych. Ta technika nadaje się również do regeneracji zużytych elementów, a nawet do wytwarzania nowych części maszyn, w tym gotowych elementów z tytanu oraz jego stopów.

Dzięki właściwościom mechanicznym tytanu, a zwłaszcza połączeniu wysokiej wytrzymałości z odpornością korozyjną, części maszyn wykonane z tego materiału znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i medycznym. Produkcja tych elementów jest jednak kosztowna ze względu na problemy występujące podczas obróbki skrawaniem. Natryskiwanie zimnym gazem stwarza szanse na przyrostowe wytwarzanie elementów tytanowych o dużych rozmiarach [7].

Tytan i jego stopy jako materiały powłokowe

Początkowo proces natryskiwania zimnym gazem był stosowany wyłącznie w celu wytwarzania powłok. Obecnie ta technologia pozwala na otrzymywanie powłok bez ograniczeń grubości.

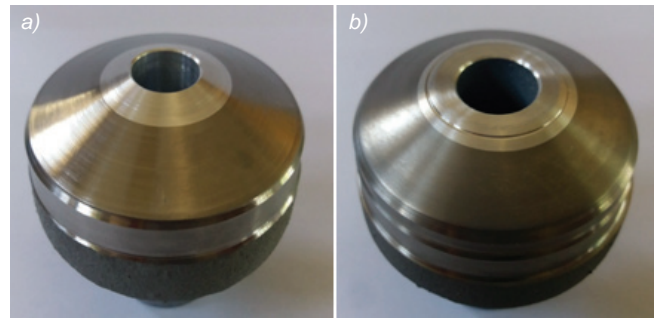
Popularnymi materiałami powłokowymi są tytan i jego stopy – w procesie natryskiwania zimnym gazem tworzą one powłoki o znikomym stopniu utlenienia. Ze względu na bardzo dobre właściwości antykorozyjne tytan służy do wykonywania powłok ochronnych m.in. w przemyśle lotniczym.

Trudności z uzyskaniem tytanowej powłoki natryskiwanej zimnym gazem wynikają z konieczności zapewnienia wysokiej prędkości krytycznej, umożliwiającej osadzenie materiału powłokowego [8]. Ta technologia pozwala na wytwarzanie powłok o znikomej porowatości, pod warunkiem optymalnego dobrania parametrów natryskiwania. Wyższe ciśnienie gazu i temperatura powodują wzrost prędkości przepływu gazu – w rezultacie rośnie prędkość cząsteczek proszku. Gazami stosowanymi do natryskiwania powłok z tytanu i jego stopów są azot i hel [9].

Skuteczność osadzania cząsteczek tytanu lub jego stopów na powierzchni elementu w procesie natryskiwania zimnym gazem wynosi ok. 85%. Prędkość ziaren, gwarantująca ich osadzenie na podłożu, mieści się w przedziale od 500 do 750 m/s, a wartość adhezji – w przedziale od 50 do 85 MPa. Wcześniej poddanie podłoża obróbce strumieniowo-ścierniej z użyciem grubego ścierniwa (tlenku glinu) poprawia wiązanie powłoki z podłożem.

W powłokach tytanowych natrykiwanych zimnym gazem zawartość tlenu jest trzykrotnie niższa niż w powłokach uzyskanych w procesach wysokotemperaturowych. Wytrzymałość tych powłok na rozciąganie wynosi (zależnie od ich porowatości) od 100 do 800 MPa. Moduł Younga jest równy 20 MPa i jest znacznie niższy od modułu Younga użytego materiału proszkowego (100 GPa) [10].

Na rys. 2 przedstawiono natryskane zimnym gazem struktury z tytanu oraz ze stopu tytanu Ti-6Al-4V, wytworzone na Politechnice Świętokrzyskiej z użyciem wysokociśnieniowego systemu Impact Innovations 5/8.



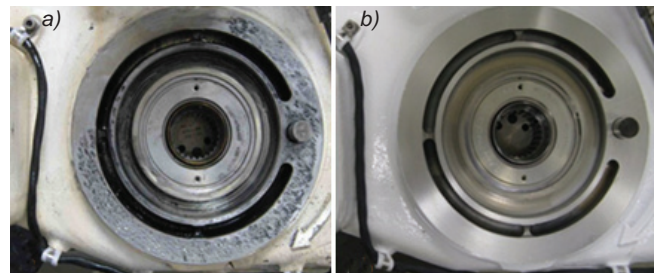
Rys. 2. Otrzymane w procesie natryskiwania zimnym gazem powłoki: a) tytanowa, b) ze stopu tytanu Ti-6Al-4V

Natryskiwanie zimnym gazem w sektorze lotniczym

Proces natryskiwania zimnym gazem umożliwia przywrócenie cech wymiarowych elementom, które uległy zmianie w wyniku korozji, zużycia bądź uszkodzeń mechanicznych. Tę metodę stosuje się m.in. do naprawy uszkodzonych powierzchni części lotniczych przez odbudowywanie utraconego materiału do oryginalnych wymiarów. Dzięki wydłużeniu żywotności eksploatowanych elementów redukuje się koszty związane z zakupem nowych części [10].

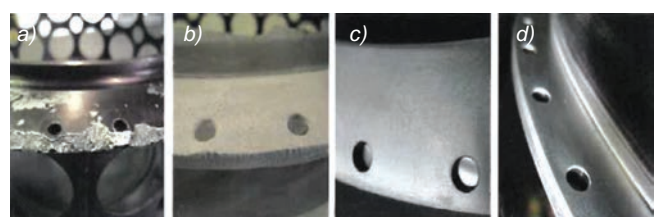
Regeneracja techniką natryskiwania zimnym gazem jest szeroko stosowana w lotnictwie cywilnym i wojskowym. Ta metoda jest odpowiednia do naprawy części samolotowych z aluminium i magnezu. Wykorzystuje się ją do regeneracji skrzyń biegów, obudów przekładni, obudów wlotu czy siłowników samolotowych [11].

Na rys. 3 pokazano nakładkę pompy hydraulicznej przed regeneracją i po regeneracji przeprowadzonej metodą natryskiwania zimnym gazem. Natryskana powłoka uzupełniła ubytki w materiale podłoża i po obróbce ubytkowej przywróciła właściwości eksploatacyjne regenerowanego elementu.



Rys. 3. Nakładka pompy hydraulicznej na obudowie przekładni z odlewane aluminium A357: a) uszkodzona na filtrze, b) po regeneracji – z powłoką otrzymaną w procesie natryskiwania zimnym gazem [10]

■ **Korozja elementów w silnikach lotniczych.** Natryskiwanie zimnym gazem rozwinęło się jako technika naprawy elementów na bazie aluminium, w tym ze stopów 6061 i 7075, które podczas eksploatacji bardzo często ulegają korozji [12]. Na rys. 4 przedstawiono proces regeneracji aluminiowego komponentu w silniku odrzutowym.



Rys. 4. Regeneracja aluminiowego komponentu silnika odrzutowego: a) uszkodzenie korozyjne, b) natryskiwanie aluminium na powierzchnię, c) proces obróbki skrawaniem, d) gotowa część [12]

Uszkodzoną powierzchnię po wstępnym przygotowaniu poddano procesowi natryskiwania zimnym gazem w celu jej pierwotnego odtworzenia. Otrzymaną powłokę poddano następnie procesom obróbki skrawaniem i obróbki wykończeniowej.

■ **Zużycie łącznika zawiasów w samolocie.** W bagażniku wojskowego samolotu transportowego łączniki zawiasów są wykonane z materiału Al-7075-T6. Podczas eksploatacji drzwi zawiasy są narażone na zużycie i korozję. Proces regeneracji tych elementów wymaga wielu roboczogodzin. W celu naprawy zepsutych zamków stosuje się natryskiwanie zimnym gazem. Proces ten umożliwia nałożenie warstwy z proszku Al-7075 bez konieczności demontażu zawiasów ze statku powietrznego [11].

Na rys. 5 zaprezentowano okucia zawiasów, wykonane z Al-7075-T6, przed regeneracją i po regeneracji.

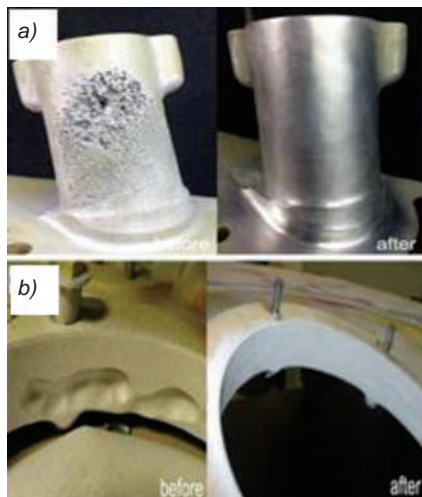


Rys. 5. Okucia zawiasów, wykonane z Al-7075-T6, które można zregenerować bez konieczności ich demontażu ze statku powietrznego [11]

■ **Uszkodzenia obudów skrzyń biegów śmigłowców.** Do wytwarzania tych elementów stosuje się magnez i jego stopy, które mają dużą sztywność, małą gęstość oraz wysoką przewodność cieplną. W następstwie długotrwałej eksploatacji w trudnych warunkach magnezowe obudowy ulegają korozji. Naprawa skorodowanej powierzchni jest możliwa przez natryskanie zimnym gazem warstwy powłoki z aluminium lub stopów aluminium. Testy mechaniczne i korozyjne naprawionych powierzchni potwierdziły, że proszki użyte w procesie natryskiwania zapewniają uzyskanie powłok o dobrej przyczepności oraz wysokiej odporności na zużycie i korozję.

Elementy naprawione w procesie natryskiwania zimnym gazem spełniają wszelkie wymagania w zakresie przywrócenia ich do użytku [13].

Na rys. 6 przedstawiono skrzynie biegów śmigłowców S-92 i UH-60 przed regeneracją i po regeneracji metodą natryskiwania zimnym gazem.



Rys. 6. Porównanie elementów uszkodzonych i po regeneracji: a) skrzynia biegów śmigłowca S-92, b) skrzynia biegów śmigłowca UH-60 [13]

Wnioski

Natryskiwanie zimnym gazem to innowacyjna technika nakładania powłok, która obecnie znalazła również zastosowanie w procesach przyrostowych i w regeneracji. W tej technologii istotny jest zwłaszcza brak niekorzystnego wpływu temperatury na cząstki materiału powłokowego i podłoże. Dzięki temu możliwe jest otrzymanie powłok o właściwościach, które są nieosiągalne w przypadku zastosowania innych procesów z obszaru inżynierii powierzchni.

Omawiana metoda jest szczególnie przydatna w wytwarzaniu grubych warstw powłok ochronnych na elementach i częściach maszyn, które są wrażliwe na ciepło.

Tytan i jego stopy wykazują doskonałą odporność korozyjną w porównaniu ze stalami stopowymi. W przemyśle lotniczym używa się ich do konstruowania elementów poddanych dużym obciążeniom. Dzięki zastosowaniu tytanu i jego stopów możliwe jest ograniczenie masy konstrukcyjnej samolotu. Wykorzystanie aluminium i jego stopów w procesach regeneracji rozszerzyło możliwości tego procesu.

Natryskiwanie zimnym gazem jest innowacyjną techniką, która stwarza nowe perspektywy w dziedzinie konstruowania części maszyn.

Praca finansowana ze środków na naukę NCBR w ramach programu Innotot „Badania technologii przyrostowych i procesów hybrydyzacji obróbki dla potrzeb rozwoju innowacyjnej produkcji lotniczej”.

LITERATURA

1. Żórawski W., Góral A., Bokuvka O., Lityńska-Dobrzyńska L., Berent K. "Microstructure and tribological properties of nanostructured and conventional plasma sprayed alumina-titania coatings". *Surface and Coatings Technology*. 268 (2015): s. 190–197.
2. Gärtner F., Stoltenhoff T., Schmidt T., Kreye H. "The cold spray process and its potential for industrial applications." *Proceedings of the ITSC 2005 Basel*, s. 158–163.
3. Silva F.S., Cinca N., Dosta S., Camp I.G., Guilemany J.M., Benedetti A.V. "Cold gas spray coatings: basic principles, corrosion protection and applications". *Eclética Química Journal*. 42 (2017): s. 9–32.
4. Małachowska A., Winnicki M., Ambroziak A. „Perspektywy natryskiwania niskociśnieniową metodą Cold Spray”. *Przegląd Spawalnictwa*. 10 (2012): s. 2–6.
5. Klassen T., Gärtner F., Schmidt T., Kliemann J.-O., Onizawa K., Donner K.-R., Gutzmann H., Binder K., Kreye H. "Basic principles and application potentials of cold gas spraying". *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 41, 7 (2010): s. 575–584.
6. Hussain T., McCartney D.G., Shipway P.H., Marrocco T. "Corrosion behavior of cold sprayed titanium coatings and free standing deposits". *Journal of Thermal Spray Technology*. 20, 1 (2011): s. 260–274.
7. MacDonald D., Fernández R., Delloro F., Jodoin B. "Cold spraying of Armstrong process titanium powder for additive manufacturing". *Journal of Thermal Spray Technology*. 26, 4 (2017): s. 598–609.
8. Hussain T. "Cold spraying of titanium: a review of bonding mechanisms". *Key Engineering Materials*. 533 (2012): s. 53–90.
9. Luo X., Wei Y., Wang Y., Li Ch. "Microstructure and mechanical property of Ti and Ti6Al4V prepared by an in-situ shot peening assisted cold spraying". *Materials and Design*. 85 (2015): s. 527–533.
10. www.secnv.navy.mil/innovation/HTML_Pages/2016/05/FRCSW-ColdSpray.htm
11. Kay C.M., Karthikeyan J. "High Pressure Cold Spray: Principles and Applications". ASM International, 2016.
12. Villafuerte J., Wright D. "Practical cold spray success: repair of Al and Mg alloys aircraft components". *International Thermal Spray and Surface Engineering*. 5, 2 (2010).
13. Yin S., Aldwell B., Lupoi R. "Cold Spray Additive Manufacture and Component Restoration". *Cold-Spray Coatings*. Springer International Publishing, 2018.