



Obróbka podzerowa metali- najnowsze badania naukowe oraz wdrożenie przemysłowe w procesach obróbki cieplnej.

Sub-zero treatment of metals—most recent scientific research and industrial implementation in heat treatment

Georg LEHMKUHL, Justyna TOMALSKA

Georg Lehmkuhl, ALTEC GmbH, Air Liquide, Niemcy
Justyna Tomalska, Air Liquide, Polska



W KILKU SŁOWACH

W artykule przedstawiono proces obróbki podzerowej jako jedną z możliwych metod na usunięcie austenitu szczątkowego po hartowaniu w celu poprawy twardości, odporności na ścieranie i stabilności wymiarowej części. Przybliżony został również temat głębokiego wymrażania długookresowego DCT, który ma na celu poprawę własności mechanicznych oraz struktury materiału. Dodatkowo omówiono i porównano dostępne urządzenia na rynku do wymrażania w zależności od potrzeb klienta (rodzaj wsadu, zastosowanie, typ produkcji). Poruszony został również aspekt ekonomiczny dostępnych rozwiązań biorąc pod uwagę ich przeznaczenie, konstrukcję oraz koszt.



SUMMARY

In the article the process of sub-zero treatment is described as one of the possible methods of removing austenite retained in a component after quenching in order to achieve better hardness, wear resistance and dimensional stability. The article also provides an in depth discussion of the deep cryogenic treatment (DCT), which improves mechanical properties and the structure of a material. Additionally, the authors offer an overview and comparison of equipment for sub-zero treatment available on the market, taking into consideration customer needs (the type of the feed, usage, methods of production). Lastly, the article touches upon the economic aspects of these solutions depending on their purpose, structure and costs.

Wprowadzenie

Wymagane właściwości eksploatacyjne elementów metalowych wykonanych ze stali, takich jak: narzędzia, łożyska, koła zębate itp., zależą przede wszystkim od ich konstrukcji, technologii wykonania, warunków użycia i konserwacji. W trakcie produkcji najistotniejszym czynnikiem jest obróbka cieplna, ponieważ w jej trakcie stal otrzymuje swoje optymalne właściwości. Awarie w trakcie obróbki cieplnej i nieprzewidziane wydarzenia mają istotny wpływ na żywotność elementów. Do tej pory, w połączeniu z klasyczną obróbką termiczną przeprowadzono różne badania, aby zoptymalizować strukturę martenzytyczną

podczas hartowania, szczególnie dla wysokostopowych stali.

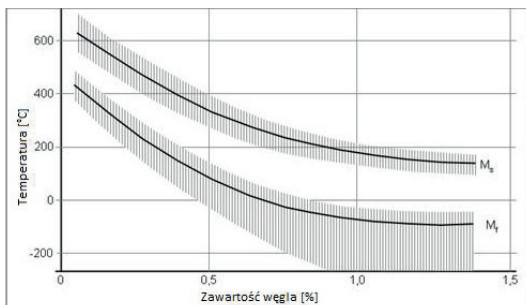
Obecnie obróbka podzerowa z powodzeniem jest stosowana do poprawy twardości i stabilności wymiarowej stali hartowanej. Główny wpływ ma na to pozbycie się austenitu szczątkowego. Ponadto, podjęto nowe próby zbadania wpływu głębokiego wymrażania długookresowego (Deep Cryogenic Treatment - DCT) z zastosowaniem bardzo niskich temperatur, bliskich punktu wrzenia ciekłego azotu lub helu w odpowiednim okresie czasu. Celem głębokiej obróbki kriogenicznej jest stworzenie dodatkowych przemian strukturalnych i stanu naprężeń własnych w materiale, z naciskiem na zoptymalizowanie własności tribologicznych.



Obróbka kriogeniczna – sposób na usunięcie austenitu szczątkowego oraz poprawę właściwości tribologicznych narzędzi

1. Powstanie austenitu szczątkowego

Celem hartowania stali węglowych jest ich schłodzenie po austenitacji i przekształcenie austenitu w strukturę martenzytyczną. W czasie chłodzenia struktura regularna przestrzennie centrowana przekształca się w strukturę tetragonalną przestrzennie centrowaną. Regularna struktura ferrytu nie jest w stanie rozpuścić zawartości węgla, dlatego węgiel zostaje wtrącony w zdeformowaną tetragonalnie siatkę martenzytu. Temperatura austenitacji i zawartość węgla determinują temperaturę początkową martenzytu M_s , przy której rozpoczyna się powstawanie martenzytu w procesie chłodzenia, a także temperaturę końcową martenzytu M_f , przy której przemiana się zatrzymuje.



Rysunek 1. Temperatura początku i końca przemiany martenzytycznej.

Przy zawartości węgla niemal 0,5%, temperatura końcowa martenzytu M_f osiąga temperaturę pokojową, więc transformacja martenzytu nie zostaje w pełni zakończona. W takim przypadku tworzy się austenit szczątkowy (10% do 30%). Zawartość struktury twardego mar miękkiego austenitu szczątkowego w osnowie martenzytycznej wpływa na żywotność stali, szczególnie z powodu niekontrolowanej przemiany austenitu szczątkowego w martenzyt. Nie należy również zapominać, że niekontrolowane zmiany objętości powodują brak stabilności wymiarowej obrobionych cieplnie elementów co prowadzi do zaburzeń odbiorowych i eksploatacyjnych.

Usunięcie austenitu szczątkowego

Austenit szczątkowy jest jedną z głównych przyczyn awarii narzędzi, szczególnie w przypadku narzędzi do obróbki plastycznej na zim-

no i narzędzi ze stali szybko tnącej o zawartości węgla powyżej 0,8%. Obecność znacznych ilości austenitu szczątkowego powoduje spadek twardości stali i obniżenie jej odporności na ścieranie. W przypadku zmiany z obróbki w wannie solnej na obróbkę próżniową, kwestia austenitu szczątkowego jest jeszcze bardziej wyraźna, w wielu przypadkach ze względu na jego zwiększoną ilość.

W zależności od właściwości stali, austenit szczątkowy może zostać usunięty w wielokrotnym cyklu odpuszczania z kilkoma etapami podgrzewania i chłodzenia. Wymagania odnośnie czasu obróbki, logistyki i energii są bardzo wysokie. Stosowanie obróbki podzerowej jako sposobu usuwania austenitu szczątkowego staje się coraz bardziej popularną alternatywą dla wielokrotnego odpuszczania. W celu uniknięcia stabilizacji austenitu szczątkowego, chłodzenie powinno odbywać się zaraz po hartowaniu, w połączeniu z postępującym po nim odpuszczaniem, w efekcie, austenit szczątkowy jest przekształcany niemal w całości w martenzyt. Temperatury obróbki podzerowej ustala się w zależności od temperatury końca przemiany martenzytycznej, charakterystycznej dla poszczególnych gatunków stali.

2. Głębokie wymrażanie długookresowe DCT- poprawa żywotności narzędzi

Głębokie wymrażanie długookresowe DCT (Deep Cryogenic Treatment) może być zdefiniowane jako „Budowanie zmian strukturalnych i mechanicznych w materiałach poprzez działanie głębszych temperatur kriogenicznych do -269°C ”. Jest to odmienny proces od obróbki kriogenicznej używanej do usuwania austenitu szczątkowego. W ostatnich latach podjęto nowe próby zbadania wpływu głębokiego wymrażania długookresowego (DCT) na właściwości stali narzędziowej w bardzo niskich temperaturach.

Celem zastosowania głębokiego wymrażania długookresowego jest otrzymanie optymalnego połączenia właściwości mechanicznych takich jak twardość, odporność na zużycie, wytrzymałość i odporność na pęknięcia zmęczeniowe. Teorie na temat przyczyn efektów obróbki kriogenicznej obejmują niemal kompletną przemianę austenitu szczątkowego w różnorodne formy morfologiczne martenzytu. Taka przemiana zo-



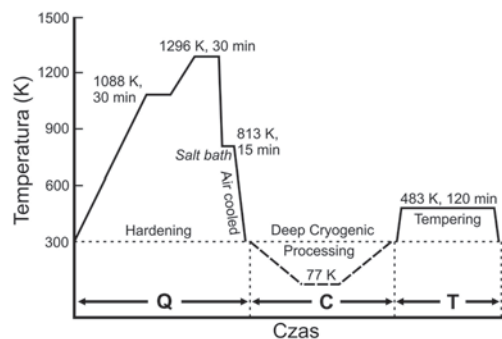


stała zweryfikowana teoretycznie i potwierdzona eksperymentalnie za pomocą rentgenografii strukturalnej XRD.

Druga teoria wyjaśniająca zwiększona twardość i odporność na zużycie w warunkach niskich temperatur, to wytrącanie submikroskopowych węglików. Związana jest z tym redukcja napięć wewnętrznych martenzytu, która ma miejsce w momencie pojawienia się submikroskopowych wytrąceń węglików. Redukcja tendencji do mikropęknięć wynikająca ze zmniejszonego naprężeń własnych jest powodem poprawy kompleksu właściwości mechanicznych i mikrostrukturalnych.

Jak używać głębokiego wymrażania długookresowego?

Początkowo zakładano, że DCT można osiągnąć poprzez zanurzenie elementów stalowych bezpośrednio w ciekłym azocie. Taki szok termiczny powodowałby nieporządane naprężenia na powierzchni lub wewnątrz stali. Również szybkie chłodzenie nie pozwoli na wystąpienie pewnych zmian w strukturze krystalicznej. Należy również zauważyć, że DCT nie jest samodzielnym rozwiązaniem – proces ten nie może być analizowany oddzielnie od procesów obróbki termicznej i właściwości materiału. Udań zastosowanie DCT wymaga ostrożnie zaplanowanej obróbki z dopasowanymi parametrami hartowania i wyżarzania.



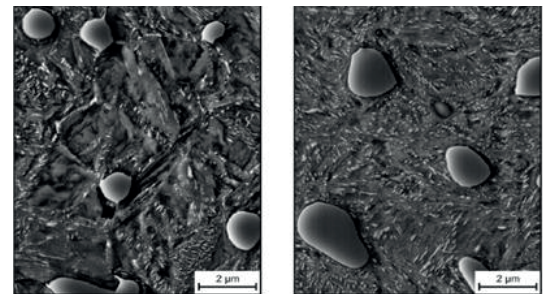
Rysunek 2 Profil temperatury cyklu DCT – głębokiego wymrażania długookresowego

DCT jest wykorzystywane w ramach procesu konwencjonalnej obróbki cieplnej poprzez powolne wychładzanie narzędzia do temperatur ekstremalnych od -150°C (lub 123K) do -196 °C (lub 77K) / (269°C) i utrzymywanie ich w tej temperaturze przez długi okres czasu, od 8 do

48 godzin Rys (2). Po schłodzeniu elementy są bardzo powoli ogrzewane do temperatury otoczenia.

Wpływ na właściwości tribologiczne

Jeżeli obróbka cieplna została przeprowadzona prawidłowo, różne badania wskazują, że DCT ma wymierny wpływ na właściwości stali narzędziowej. Proces ten nie pozwala na zakończenie całkowite przemiany austenitu szczytkowego, więc cykl lub cykle hartowania muszą zawsze być przeprowadzane w taki sposób, aby przemiana została zakończona. Połączenie DCT z hartowaniem pozwala na utworzenie mikrostruktury martenzytu z większą ilością wtórnych węglików (Rys.2). W przypadku próbek DCT liśty martenzytu są jeszcze cieńsze.



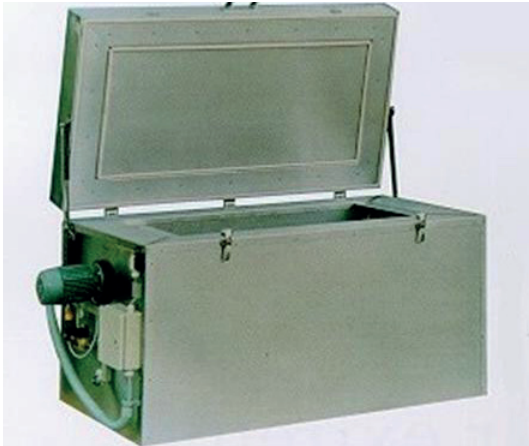
Rysunek 3 Mikrostruktura konwencjonalnej i poddanej DCT stali narzędziowej 1.2379

3. Urządzenia kriogeniczne

W celach praktycznego usuwania austenitu szczytkowego w zakładach obróbki cieplnej, zostało stworzonych kilka rodzajów urządzeń kriogenicznych.

Komory ładowane od góry- Top lid Chambers- ALP

Dobre izolowane komory z pokrywą są standardowym i tanim rozwiązaniem zapewniającym chłodzenie z temperatury otoczenia do -180°C. Komory są wykonane ze stali nierdzewnej i dostępne w różnych rozmiarach. Ciekły azot jest wprowadzany bezpośrednio do komory. Specjalnie zaprojektowany system wentylacyjny rozprowadza równomiernie odparowany gaz po komorze unikając bezpośredniego kontaktu z samym wsadem. Dla dokładnej regulacji temperatury, komory zostały wyposażone w system kontrolny, aby można było przeprowadzać indywidualne krzywe chłodzenia/podgrzewania.



Rysunek 4 Komora Top Lid

Komory z funkcją podgrzewania- ALP

Indywidualne potrzeby obróbki cieplnej dotyczącej funkcji podgrzewania często wymagają komór zbudowanych na zamówienie. Zaprojektowane komory spełniają wymagania dotyczące bezpieczeństwa, obsługi wsadu, integracji z automatycznymi liniami obróbki cieplnej, cyklami wyżarzania w wysokich temperaturach itp. Standardowe wykonanie obejmuje temperatury w zakresie od -140°C do temperatury pokojowej z możliwością osiągnięcia $+300^{\circ}\text{C}$ lub nawet $+600^{\circ}\text{C}$.



Rysunek 4 Komora Top Lid

Komory do pracy ciągłej- ALP

W celu ciągłego usuwania austenitu szczytkowego chłodnie kriogeniczne mogą być zintegrowane z liniami obróbki cieplnej klienta. Taki osprzęt jest w szczególności używany przy masowej produkcji elementów w temperaturach do -130°C .

Linia wentylatorów i specjalnie zaprojektowany system doprowadzania ciekłego azotu

zapewnia jednolity rozkład temperatury połączoną z szybką wymianą ciepła. Podstawowe wymagania BHP są zgodne z normami Europejskimi i specyfikacjami IMS Grupy Air Liquide.



Rysunek 4 Komora Top Lid

Urządzenia próżniowe z funkcją chłodzenia- Seco/Warwick

Istnieje również możliwość dostosowania pieca próżniowego do obróbki podzerowej. Przykładowe urządzenie może mieć wymiary $600 \times 600 \times 900$ [cm] i pracować do temperatury -180°C (dane od Seco/Warwick).

Porównanie dostępnych rozwiązań

Dobierając urządzenie do obróbki cieplnej należy mieć na uwadze nie tylko aspekty techniczne ale i również ekonomiczne. Koszt urządzenia, zużycie gazu ciekłego oraz energii elektrycznej ma znaczny wpływ na opłacalność procesu. W celu zminimalizowania tych kosztów komory są dobierane na podstawie indywidualnie dobranych parametrów takich jak: masa wsadu, profil produkcji czy rodzaj ładunku.

Biorąc pod uwagę prostą konstrukcję oraz niewielkie rozmiary, komory ładowane od góry są najbardziej popularnym rozwiązaniem. Teoretycznie zakłada się, że na 1 kg stali/ wsadu przypada 0,4 kg ciekłego azotu. Warunek ten spełniają również komory z funkcją podgrzewania oraz do pracy ciągłej. Dodatkowym atutem tych urządzeń jest możliwość ich dzierżawy co umożliwi uniknięcia kosztów inwestycji.

Na rynku są dostępne również piece próżniowe dostosowane do procesu wymrażania. Ze względu na izolację oraz specjalną konstrukcję pieca, potrzebną do zachowania próżni, dodatkowa funkcja wymrażania może przynosić straty ciepła i często nie jest uzasadniona ekonomicznie. Proces potrzebuje znaczną ilość ciepła do

Bibliografia
 [01] H. Hougardy: Gedanken zur Wärmebehandlung von Stahl. HTM 52 (1997) Pages 12-19
 [02] I. Jung et al: Sammlung Werkzeugschäden. HTM 56 (2001) Pages 55-62
 [03] G.Krauss: Struktur von Martensit in Stählen. HTM 41 (1986) Pages 56-60
 [04] W. Liebfahrt et al: Einfluss der Wärmebehandlung auf die Festigkeitseigenschaften von höchstlegierten, pulvermetallurgisch hergestellten Werkzeugstählen. HTM 58 (2003) Pages 90-97
 [05] W. Bückler, J. Busse: Restaustenitumwandlung durch Flüssiggaskälte. Gas Aktuell
 [06] P. Sommer: Untersuchungen zum Restaustenitfall gehärteter Stähle Gutachten TFWW-Projekt 07 2003/2004
 [07] T.Yugandhar, P.K. Krishnan: Cryogenic Treatment and it's Effect on Tool Steel: 6th International Tooling Conference, Karlstad, Sweden
 [08] F.Wendl, A.Oppenkowski et al.: Influence of deep-cryogenic treatment on the wear resistance of stamps. HTM 66 (2011) Pages 256-265
 [09] M.Pellizzari et al: Influence of different deep cryogenic treatment routes on the properties of high speed steel. HTM 67 (2012) Pages 111-117
 [10] F. Diekman, R. Papp: Cold Facts about Cryogenic Processing. Heat Treating Progress, October 2009, Pages 33-36
 [11] Materiały przekazane przez Seco/Warwick





obniżenia temperatury wewnątrz urządzenia oraz ciekłego azotu w stosunku do masy wsadu. W porównaniu do komór dedykowanych wzrost zużycia ciekłego azotu może być większy o ok. 30%. Bardzo często bardziej opłacalne jest rozdzielenie tych dwóch procesów obróbki ze względu na czas potrzebny do schłodzenia pieca próżniowego, co w znaczny sposób może wpłynąć na usprawnienie produkcji. Jest to jeden z ważniejszych parametrów, zwłaszcza w hartowniach usługowych.

Źródło- ciekły azot LIN

Użycie ciekłego azotu (LIN) jest dobrze znaną i stosowaną metodą chłodzenia w wielu sektorach przemysłu. Ciekły azot jest produkowany przemysłowo poprzez destylację frakcyjną ciekłego powietrza. W formie ciekłej azot może być łatwo transportowany i przechowywany w zbiornikach i pojemnikach próżniowych. W ciśnieniu atmosferycznym punkt wrzenia ciekłego azotu to -196°C . Energia chłodzenia wygenerowana w czasie produkcji może zostać w pełni wykorzystana przez klienta, w szczegól-

ności energia odparowania ciekłego o wartości $198,6 \text{ kJ/kg}$ jest odpowiednia dla szybkiego i efektywnego chłodzenia.

4. Wnioski

1. Obróbka podzerowa części po hartowaniu jest jedną z najpopularniejszych metod pozbycia się austenitu szczątkowego w materiale, który w znaczny sposób wpływa na właściwości mechaniczne i strukturę stali.
2. W celu poprawy żywotności narzędzi, w ostatnich latach zaczęto badania nad głębokim wymrażaniem długookresowym DCT.
3. Dobierając urządzenie do obróbki podzerowej, należy mieć na uwadze nie tylko aspekty techniczne ale też ekonomiczne.
4. Ze względu na koszt, zużycie mediów oraz elastyczność sprzęty dedykowane (komory ładowane od góry, komory w funkcję podgrzewania, komory do pracy ciągłej) w wielu przypadkach są bardziej opłacalnym rozwiązaniem niż sprzęty przerobione (np. piec próżniowy z funkcją wymrażania).



POREXTHERM
wiodący producent wysokowydajnych izolacji, dołączył do grona firm Morgan Advanced Materials w grupie Thermal Ceramics.

<http://www.porextherm.com/en/products.html>
<http://www.morganthermalceramics.com/products/microporous-insulation/porextherm>

Już od dziś materiały mikroporowate są dostępne w ofercie!

Thermal Ceramics Polska Sp. z o. o.
ul. Towarowa 9, 44-100 Gliwice

T: +48323053113
T: +48323053114
F: +48323053115
E : polska.tc@morganplc.com
W: www.morganthermalceramics.com

