

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

**PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPŁYWOWYCH**

**TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY**

94

GDAŃSK 1992

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machines

RADA REDAKCYJNA – EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
WŁODZIMIERZ PROSNIAK · ROBERT SZEWAŁSKI (PRZEWODNICZĄCY – CHAIRMAN)
JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY – EXECUTIVE EDITORS

EDWARD ŚLIWICKI – P. O. REDAKTOR – EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA – EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN

ul. Gen. Józefa Fischera 14, 80-952 Gdańsk, skr. poczt. 621, tel. 41-12-71 wew. 141

ISSN 0079-3205

WYDAWCA: Redakcja Wydawnictw Ciągłych IMP PAN

80-952-Gdańsk, skrytka poczt. 621, tel. 41-12-71

Skład komputerowy A. D. Kardaś

Drukarnia: Chromatografia w Rumii

KAZIMIERZ STELLER, ANDRZEJ GOLLNAU,
TADEUSZ KRZYSZTOFOWICZ, JANUSZ STELLER

Gdańsk

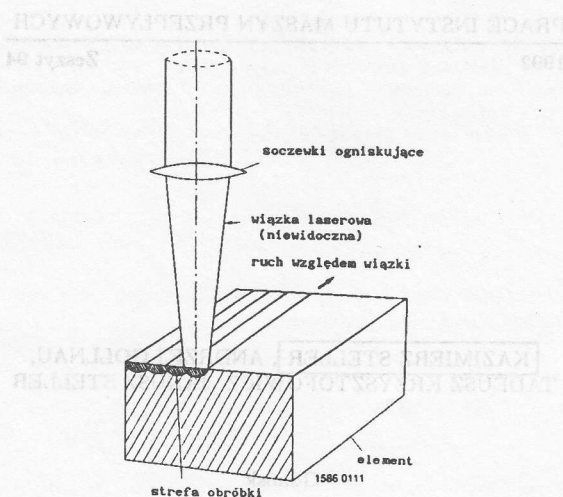
Odporność stali chromowej na działanie kawitacji po utwardzeniu laserowym

Przedstawiono wyniki badań erozyjnych stali chromowej X20Cr13V hartowanej powierzchniowo laserem CO₂ o pracy ciągłej i mocy 1050 W. Badania erozyjne wykonano na stanowisku magnetostrykcyjnym. Po zastosowaniu odpuszczania stwierdzono blisko 10-krotny wzrost odporności w stosunku do stanu wyjściowego. Dokonano optymalizacji parametrów obróbki.

1. Wprowadzenie

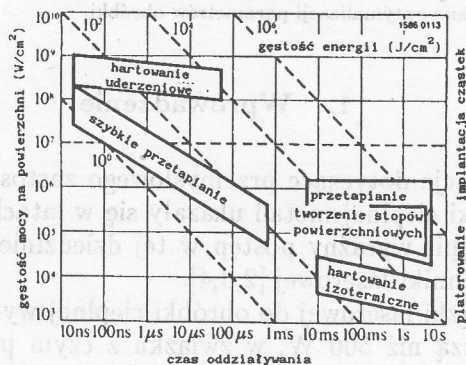
Pierwsze informacje dotyczące przemysłowego zastosowania laserów technologicznych do obróbki cieplnej metali ukazały się w latach siedemdziesiątych [1]. Od tego czasu nastąpił wyraźny postęp w tej dziedzinie i rozszerzył się zakres wykorzystywania techniki laserowej [2,3,4].

Zastosowanie wiązki laserowej do obróbki cieplnej wymaga zwykle pracy ciągłej z mocą nie niższą niż 500 W, w związku z czym praktyczne zastosowanie do tych celów znajdują przepływowe lasery CO₂ emitujące promieniowanie podczerwone o długości fali $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$. Dostępne na rynku lasery CO₂ o pracy ciągłej osiągają moc do 15 kW, zaś ich sprawność sięga 15, a nawet 20%. Obróbka cieplna za pomocą takiego lasera wymaga przesuwania wiązki promieniowania po powierzchni materiału w uprzednio zaprogramowany sposób (rys.1). Niezbędne dla celów technologicznych rozszerzenie strefy oddziaływania wiązki laserowej z warstwą wierzchnią materiału można uzyskać poprzez jej rozogniskowanie i oscylację w kierunku prostym do kierunku przesuwu obrabianej powierzchni [1]. Typowa szerokość śladu ("ściegu") wiązki na obrabianym materiale waha się od kilku do kilkudziesięciu milimetrów.



Rys. 1. Ruch wiązki laserowej względem materiału podczas obróbki powierzchniowej [5]

Zależnie od mocy lasera i jakości wiązki uzyskuje się gęstość mocy w ognisku między 100 a 10^9 W/cm^2 , co umożliwia stosowanie różnych technologii obróbki powierzchniowej (rys.2).



Rys. 2. Parametry obróbki powierzchniowej metali przy użyciu różnych technologii laserowych [5]

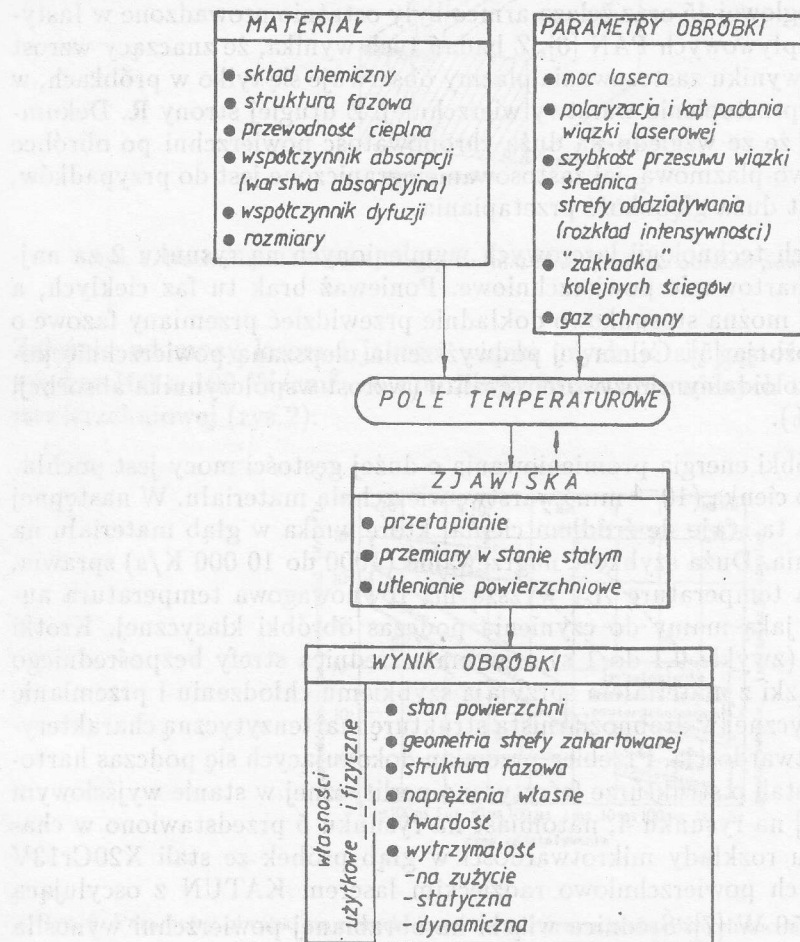
Na absorpcję energii przez ulepszany materiał, a tym samym na efekt końcowy procesu technologicznego, wpływ mają zarówno parametry obróbki (długość fali promieniowania, gęstość mocy, kąt padania wiązki na powierzchnię materiału, atmosfera nad tą powierzchnią) jak i własności obrabianego materiału (skład chemiczny i fazowy, chropowatość powierzchni i temperatura). Występujące tu powiązania przedstawiono schematycznie na rysunku 3, zaś zależności ilościowe

zostały omówione krótko w artykule przeglądowym R. Dekumbisa [5]. W warunkach podkrytycznych (bez obłoku plazmowego nad powierzchnią materiału) współczynnik absorpcji wypolerowanych powierzchni metalicznych zawarty jest w przedziale między 2 a 20%, a typowa wartość tego współczynnika na powierzchni stali konstrukcyjnej podgrzanej do temperatury 1900 K wynosi 14%. W warunkach absorpcji nadkrytycznej, gdy obłok plazmowy pozostaje w bezpośrednim kontakcie z obrabianą powierzchnią, współczynnik ten może być znacznie wyższy i sięgać nawet 100%. Badania rozpoznawcze nad strukturą i własnościami mechanicznymi ulepszanych tym sposobem warstw wierzchnich stali stopowych 2H13 i 1H18N9T, stali węglowej 45 oraz żelaza armco były ostatnio prowadzone w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN [6]. Z badań tych wynika, że znaczący wzrost mikrotwardości w wyniku zastosowania plazmy obserwuje się tylko w próbkach, w których nastąpiło przetopienie warstwy wierzchniej. Z drugiej strony R. Dekumbis zwraca uwagę, że ze względu na dużą chropowatość powierzchni po obróbce technologią laserowo-plazmową, jej zastosowanie ograniczone jest do przypadków, gdy wymagana jest duża głębokość przetapiania.

Pośród różnych technologii laserowych wymienionych na rysunku 2 za najprostszą uchodzi hartowanie powierzchniowe. Ponieważ brak tu faz ciekłych, a zatem i konwekcji, można stosunkowo dokładnie przewidzieć przemiany fazowe o ile znana jest absorpcja [5]. Celem jej podwyższenia ulepszaną powierzchnię pokrywa się zwykle koloidalnym roztworem grafitu (wzrost współczynnika absorpcji do 60 a nawet 80%).

W trakcie obróbki energia promieniowania o dużej gęstości mocy jest pochłaniana przez bardzo ciekłą (10^{-4} mm) warstwę wierzchnią materiału. W następnej kolejności warstwa ta staje się źródłem ciepła, które wnika w głąb materiału na skutek przewodzenia. Duża szybkość nagrzewania (1000 do 10 000 K/s) sprawia, że materiał osiąga temperaturę A_{c1} wyższą niż równowagowa temperatura austenizacji A_1 , z jaką mamy do czynienia podczas obróbki klasycznej. Krótki czas wygrzewania (zwykle 0,1 do 1 s) oraz mała średnica strefy bezpośredniego oddziaływania wiązki z materiałem sprzyjają szybkiemu chłodzeniu i przemianie struktury austenicznej w drobnoziarnistą strukturę martenzytyczną charakteryzującą się wysoką twardością. Przebieg przemian dokonujących się podczas hartowania laserowego stali o strukturze ferrytyczno-perlitycznej w stanie wyjściowym zilustrowano za [5] na rysunku 4, natomiast na rysunku 5 przedstawiono w charakterze przykładu rozkładu mikrotwardości w głąb próbek ze stali X20Cr13V (2H13) hartowanych powierzchniowo radzieckim laserem KATUN z oscylującą wiązką o mocy 1050 W [7]. Średnica wiązki na obrabianej powierzchni wynosiła 3,7 mm, zaś podwójna amplituda oscylacji – 6,3 mm, skąd wynika szerokość pojedynczego ściegu równa 10 mm. Z rysunku 5 widać, że zależnie od szybkości przesuwania wiązki laserowej V_b , grubość warstwy zahartowanej (mierzona 25%-owym wzrostem mikrotwardości) zmieniała się w granicach od 0,6 do 1,2 mm. Jak wskazuje bogate już doświadczenie, osiągniętemu tą drogą utwardzeniu warstwy wierzchniej towarzyszy wzrost odporności materiału na szybkozmienne obciążenia zmęczeniowe i ścieranie [1,8] a także energię wywołaną uderzeniami kropel

[9]. Jest to przyczyna, dla której technologia ta znalazła już szerokie zastosowanie przemysłowe. Na terenie byłej NRD stosowano ją w latach osiemdziesiątych m.in. do ulepszania wewnętrznych powierzchni silników wysokoprężnych, a także powierzchni walców maszyn papierniczych i narażonych na ścieranie elementów maszyn rolniczych [10]. Technologia znalazła również zastosowanie przy podwyższaniu odporności erozyjnej nowych i regenerowanych krawędzi spływu łopatek ostatnich stopni turbin parowych [8,11].



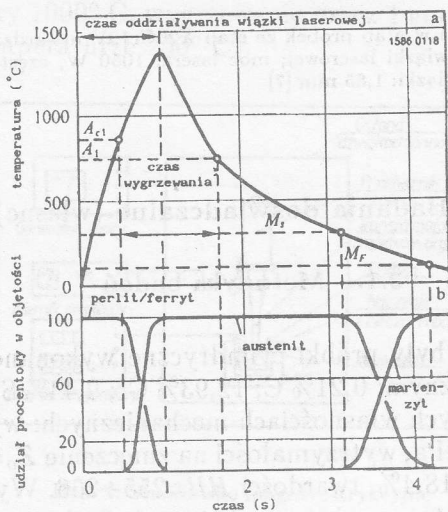
Rys. 3. Wpływ własności materiału i parametrów na wyniki utwardzania laserowego [1]

Te pozytywne doświadczenia skłoniły autorów niniejszej pracy do zbadania skuteczności hartowania laserowego jako środka podwyższania odporności erozyjnej stali konstrukcyjnych narażonych na działanie kawitacji. Istotnym argumen-

tem za podjęciem tego rodzaju badań były zachęcające wyniki dotychczasowych badań obcych [12] a także wielokrotnie potwierdzona doświadczalnie współzależność między odpornością metali na działanie kawitacji a ich twardością [13,14]. Przejawem tej współzależności jest fakt, że wszystkie zabiegi technologiczne, zmierzające do zwiększenia odporności stopów żelaza na działanie kawitacji [15] (hartowanie, azotowanie, śrutowanie, dogniatanie, utwardzanie dyspersyjne, napawanie itd) są na ogół związane ze wzrostem ich twardości. Ilościowy związek między twardością materiału a jego odpornością erozyjną wyraża formuła

$$1/MDPR = C \cdot BHN^{1.8},$$

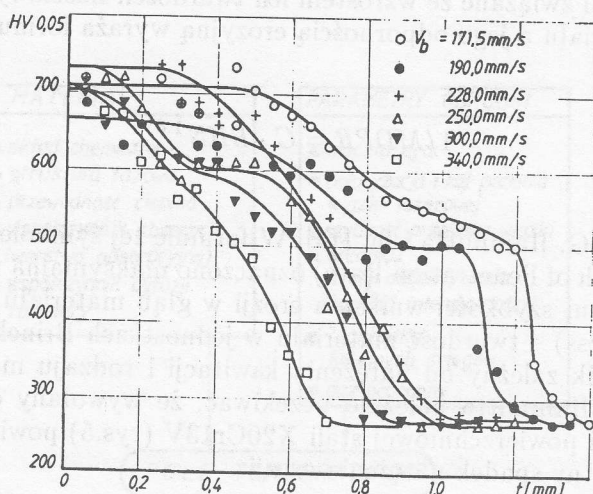
podana przez F. G. Hammitta i in. [14]. W formule tej symbolem *MDPR* (maximum Mean Depth of Penetration Rate) oznaczono maksymalną wartość uśrednionej po powierzchni szybkości wnikania erozji w głąb materiału, symbolem *BHN* (Brinell Hard Ness) – twardość materiału w jednostkach Brinella, zaś symbolem *C* – współczynnik zależny od natężenia kawitacji i rodzaju materiału. Zgodnie z formułą F.G. Hammitta należało oczekiwać, że wywołany obróbką laserową wzrost twardości powierzchniowej stali X20Cr13V (rys.5) powinien spowodować blisko sześciokrotny spadek natężenia erozji.



Rys. 4. Przebieg laserowego hartowania martenzytycznego stali do ulepszania cieplnego (schemat); (a) temperatura powierzchni, (b) przemiany fazowe [5]

O wynikach badań laboratoryjnych próbek sporządzonych z tej właśnie stali poinformowano w niniejszej pracy. Próbkki zostały przygotowane w Centralnym

Instytucie Fizyki Ciała Stałego i Badań Materialowych Akademii Nauk NRD w Dreźnie. Badania doświadczalne przeprowadzono w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku. Badania objęte były obowiązującym do końca 1990 roku porozumieniem o współpracy oraz koordynowanym przez IMP PAN Resortowym Programem Badań Podstawowych nr 02.8.



Rys. 5. Rozkład mikrotwardości w głąb próbek ze stali X20Cr13V utwardzanych laserem KATUN, w zależności od szybkości ruchu wiązki laserowej; moc lasera: 1050 W, częstość oscylacji: 200-300 Hz, amplituda: 3,15 mm, promień wiązki: 1,85 mm [7]

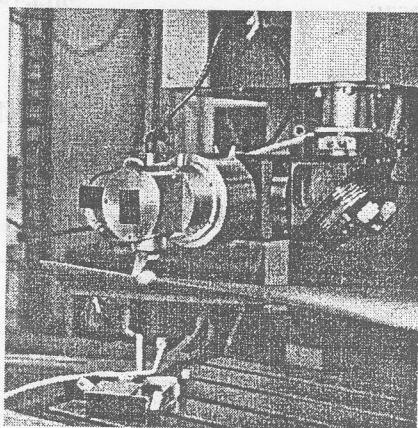
2. Badania doświadczalne (własne)

2.1. Metodyka badań

Przedmiotem badań były próbki cylindryczne wykonane ze stali X20Cr13V (2H13) o składzie chemicznym: 0,21% C; 12,93% Cr; 0,44% Si; 0,34% Mn; 0,025% P; 0,019% S i następujących własnościach mechanicznych: wytrzymałości na rozciąganie $R_m = 838 \div 850$ MPa, wytrzymałości na zmęczenie $Z_o = 655 \div 688$ MPa, wydłużeniu względnym $A = 18,4\%$, twardości $HIB = 255 \div 266$. Wybór stali chromowej był podyktowany jej zastosowaniem do konstrukcji elementów przepływowych maszyn i urządzeń hydraulicznych.

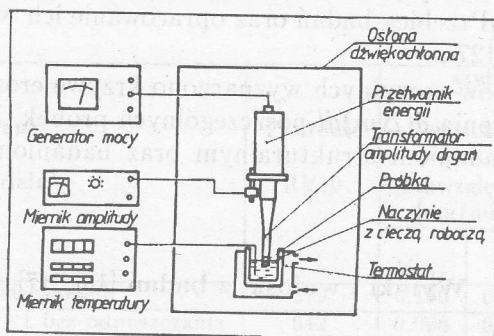
Przygotowanie próbek do badań było zróżnicowane [16]. Różnice dotyczyły szybkości V_b przesuwu wiązki promieniowania laserowego (od 170 do 340 mm/min), temperatur odpuszczenia po obróbce laserem (od 180° C do 400° C) oraz ilości ciepła wprowadzonego podczas utwardzania laserem. Próbki "obra-biano" laserem KATUN o mocy 1050 W (rys.6). Szerokość śladu laserowego wyno-

sila 10 mm. Ślady częściowo nachodziły na siebie. Szerokość "zakładki" wynosiła około 2 mm.



Rys. 6. Głowica lasera technologicznego KATUN podczas obróbki krawędzi splywu łopatki wirnika turbiny parowej [11]. Konstrukcja głowicy: Centralny Instytut Fizyki Ciała Stałego i Badań Materiałów Akademii Nauk NRD

Badano również próbki materialu w stanie dostarczenia (bez dodatkowej obróbki cieplnej) oraz po obróbce cieplnej metodą konwencjonalną (nagrzewanie w próżni do temperatury 1000°C , wygrzewanie przez 1 godzinę i chłodzenie w oleju – odpuszczanie w temperaturze 250°C).



Rys. 7. Stanowisko magnetostrykcyjne

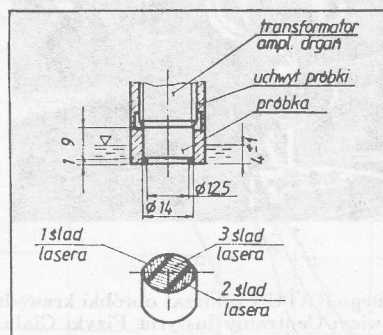
Próbki materialu poddawano działaniu kawitacji wibracyjnej na stanowisku magnetostrykcyjnym (rys.7). Podstawowe parametry pracy tego urządzenia były następujące:

częstotliwość drgań próbki	8,1 kHz
podwójna amplituda drgań próbek	50 μm

zanurzenie próbki
rodzaj cieczy roboczej
temperatura cieczy

4 ± 1 mm
woda wodociągowa
 $20 \pm 1^\circ \text{C}$.

Wymiary próbek, sposobów ich instalacji oraz przebieg śladów laserowych na ich powierzchni przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Sposób instalacji i wymiary próbki oraz przebieg śladów obróbki laserowej

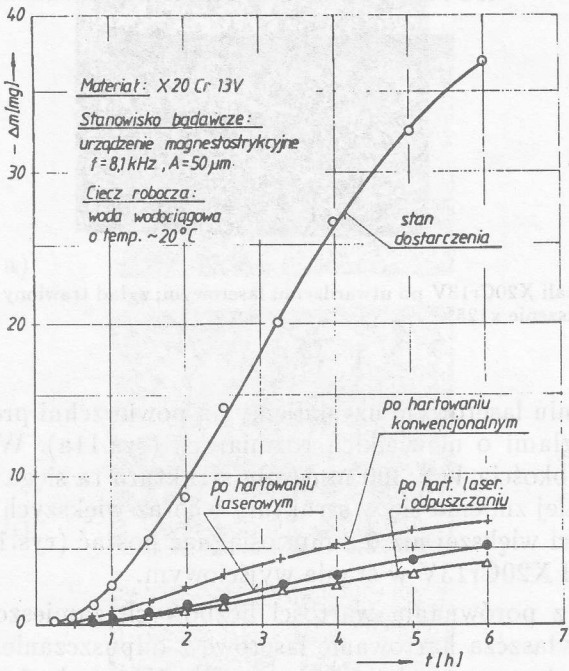
Całkowity czas ekspozycji poszczególnych próbek wynosił 360 min, a przebiegi testowania odpowiednio: 4x15 min, 3x30 min, 2x45 min i 2x60 min. Po każdej ekspozycji próbki były dokładnie czyszczone, suszone oraz ważone z dokładnością $\pm 0,05$ mg. Przebieg badań oraz opracowanie ich wyników były zgodne z normą PN-86/II-04427.

Na podstawie testów erozyjnych wyznaczono krzywe erozji całkowitej $\Delta m = f(t)$ i szybkości niszczenia $d(\Delta m)/dt$ poszczególnych próbek. Niektóre z nich poddano dodatkowym badaniom strukturalnym oraz badaniom mikrotwardości w warstwie wierzchniej.

2.2. Wyniki i wnioski z badań [16], [17], [18]

Wyniki badań przedstawiono w formie wykresów, zestawień liczbowych i fotografii.

Przebieg niszczenia próbek bez obróbki cieplnej, po hartowaniu metodą konwencjonalną oraz po hartowaniu laserowym przedstawiono na rysunku 9. Wynika stąd jednoznacznie, iż hartowanie zwiększa odporność stali na destrukcyjne działanie kawitacji, przy czym hartowanie laserowe okazuje się bardziej skuteczne od hartowania konwencjonalnego. W tabeli 1 zamieszczono wartości średnich ($\bar{V}$) i maksymalnych (V_{max}) szybkości niszczenia próbek hartowanych i nie hartowanych oraz twardości HV10 mierzone na powierzchniach owych próbek.



Rys. 9. Przebieg niszczenia próbek ze stali X20Cr13V bez obróbki cieplnej, po hartowaniu konwencjonalnym (temperatura 1000°C, 1 godz., chłodzenie w oleju), po hartowaniu laserowym (szybkość przesuwu wiązki 300 mm/min) oraz po hartowaniu laserowym i odpuszczaniu (temp. 250°C, 1 godz.).

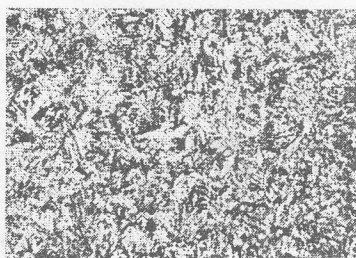
Tabela 1

Stan materiału ¹	Twardość HV10	szybkość niszczenia			
		wartości bezwzględne [mg/min]		wartości względne ²	
		V_{max}	$\bar{V}$	V'_{max}	$\bar{V}'$
bez obróbki cieplnej	279	0,180	0,110	1	1
hartowanie konwencjonalne (na wskroś)	bez odpuszczania	642	0,028	0,018	0,156
	z odpuszczaniem	571	0,027	0,017	0,150
hartowanie laserowe(powierzchniowe)	bez odpuszczania	620	0,021	0,014	0,117
	z odpuszczaniem	540	0,014	0,011	0,078

Struktura nieobrobionej cieplnie stali X20Cr13V jest przedstawiona na rysunku 10. Widać tutaj gruboziarnistą strukturę martenzytyczną. Materiał ten jest dość miękki (~280 HV10, patrz tabela nr 1) i charakteryzuje się niskimi własnościami mechanicznymi.

¹Parametry obróbki podano w podpisie do rysunku 9

²Odniesione do próbek w stanie dostarczenia



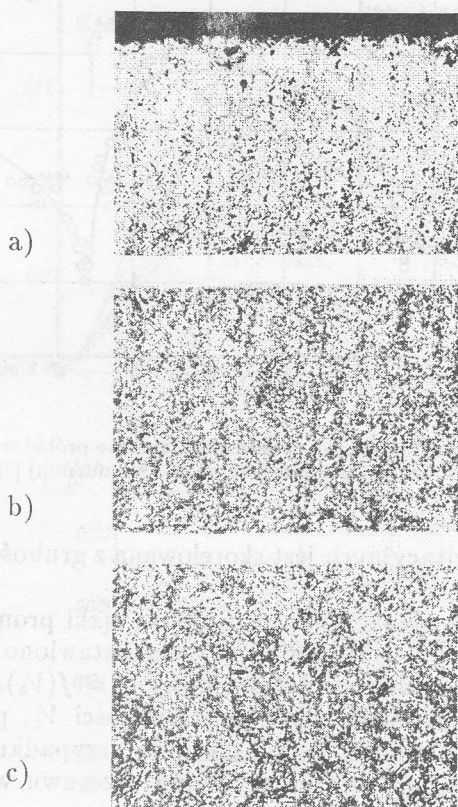
Rys. 10. Struktura stali X20Cr13V po utwardzeniu laserowym; zgląd trawiony odczynnikiem uniwersalnym Mi19Fe (powiększenie $\times 125$)

Po utwardzeniu laserowym uzyskujemy na powierzchni próbki strukturę martenzytyczną z igłami o niewielkich rozmiarach (rys.11a). W przypadku próbki obrabianej z szybkością $V_b = 300$ mm/min struktura ta sięga na głębokość około $0,5 \div 0,6$ mm. Dalej zmienia się w strukturę o coraz większych ziarnach (rys.11b), aby na głębokości większej niż 0,8 mm osiągnąć postać (rys.11c) podobną do tej jaką posiada stal X20Cr13V w stanie wyjściowym.

Jak wynika z porównania wartości liczbowych zamieszczonych w tabeli 1 hartowanie, a zwłaszcza hartowanie laserowe z odpuszczaniem, obniża szybkość niszczenia stali chromowej około 10 razy. Wynika stąd również, iż hartowanie powierzchniowe stali X20Cr13V zapewnia jej lepszą odporność od hartowania objętościowego. Ten fakt można tłumaczyć tym, iż w przypadku próbek hartowanych na wskroś występuje w całym przekroju taka sama struktura martenzytyczna, charakteryzująca się jednakową twardością. Dla próbek utwardzanych laserowo, gdzie mamy do czynienia z hartowaniem powierzchniowym, następuje zmiana struktury martenzytu: od martenzytu drobnego do martenzytu gruboigłastego. Zmianom tym towarzyszy spadek twardości, praktycznie przez całą warstwę wierzchnią. Poniżej tej warstwy mamy dość miękką, plastyczny rdzeń, który wydaje się być dobrym amortyzatorem uderzeń kawitacyjnych. Tłumienie osłabia oczywiście oddziaływanie kawitacji na materiał, a przez to zmniejsza erozję.

Rozkład mikrotwardości HV0,05 na powierzchni (wzdłuż średnicy D) próbki hartowanej za pomocą lasera KATUN z prędkością przesuwu wiązki $V_b = 300$ mm/min przedstawiono na rysunku 12. Nierównomierny rozkład twardości wynika z odpuszczania strefy granicznej wskutek nałożenia się śladów (ściegów) wiązki laserowej. W strefie granicznej nastąpił spadek twardości do około 400 HV0,05. Efekt ten powstał również z powodu nierównomiernej gęstości energii na całej szerokości "ściegu" laserowego. Największa gęstość występuje bowiem na szerokości równej podwojonej amplitudzie oscylacji wiązki promieniowania laserowego (tu: $2A_s = 6.3$ mm) i dlatego podczas procesu cieplnego temperatura na granicy tego obszaru jest niższa od temperatury austenitizacji. W tych warunkach następuje odpuszczenie wcześniej zahartowanej strefy. Pomiar twardości w głębi materiału (rys.5) potwierdza obserwacje mikroskopowe. Po przekroczeniu głębokości 0,7 mm nastąpił gwałtowny spadek twardości do twardości odpowiadającej

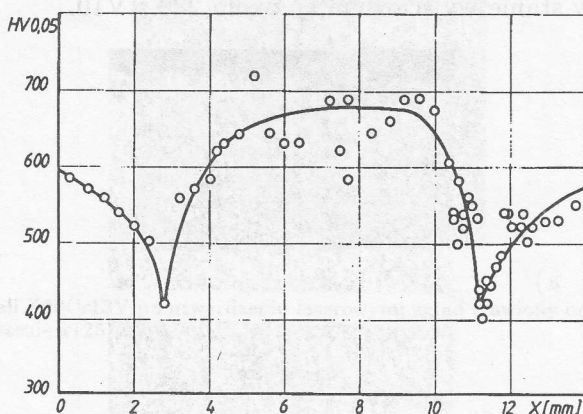
stali X20Cr13V w stanie wyjściowym tj. około 280 HV10.



Rys. 11. Struktura stali X20Cr13V po utwardzaniu laserowym; zgląd trawiony odczynnikiem uniwersalnym Mi19Fe (powiększenie x125) a) warstwa wierzchnia (martenzyt drobnoziarnisty) b) warstwa głębokości około 0,5–0,6 mm (strefa przejściowa) c) na głębokości większej od 0,8 mm (martenzyt jak w stanie dostarczenia)

Innym czynnikiem, który sprzyja wzrostowi odporności stali na działanie kawitacji, jest odpuszczanie, a zwłaszcza odpuszczanie po utwardzaniu laserowym. Wskazują na to wyniki badań przedstawione na rysunku 9 i w tabeli 1. Jak wiadomo, w wyniku odpuszczenia maleją naprężenia wewnętrzne (w tym hartownicze) i zmniejsza się kruchość, przy zachowaniu dużej twardości powierzchniowej. Przy odpuszczeniu próbek hartowanych "na wskroś" nie stwierdzono wyraźnego polepszenia ich odporności na działanie kawitacji, co należy przypisać prawie jednakowej twardości w materiale.

W tym miejscu należy wyjaśnić, iż sugerowane przyczyny wzrostu odporności stali X20Cr13V na działanie kawitacji nie są jedynymi, które należy brać pod uwagę. Przyrost odporności erozyjnej wskutek utwardzania laserowego może być spowodowany np. rozdrobnieniem martenzytu. Z drugiej strony tłumaczenie wzrostu odporności stali hartowanej powierzchniowo wskutek dość miękkiego i ciągliwego podłoża jest możliwe do przyjęcia pod warunkiem, że głębokość od-



Rys. 12. Rozkład mikrotwardości na powierzchni utwardzonej laserowo próbki ze stali X20Cr13V wzdłuż średnicy prostopadłej do kierunku ruchu wiązki laserowej ($V_b=300$ mm/min) [7]

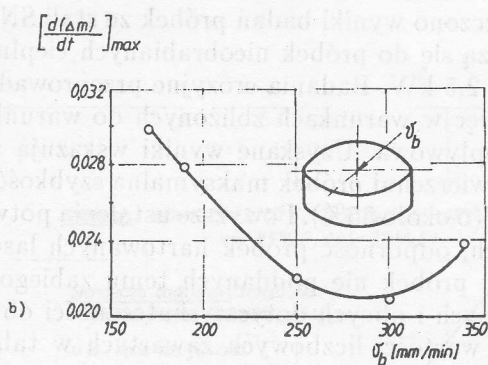
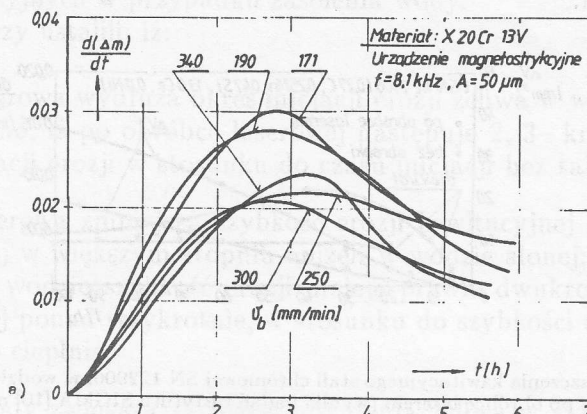
działywania impulsów kawitacyjnych jest skorelowana z grubością warstwy utwardzonej.

Wyniki badań wpływu szybkości V_b przesuwu wiązki promieniowania laserowego na odporność kawitacyjną stali X20Cr13V przedstawiono w formie krzywych $d(\Delta m)/dt = f(t)$ dla $V_b = \text{var}$ oraz $[d(\Delta m)/dt]_{\max} = f(V_b)$. Jak łatwo zauważyć (rys.13a i 13b) istnieją uprzywilejowane szybkości V_b , przy których szybkość niszczenia osiąga ekstremum. W konkretnym przypadku najmniejsza wartość $[d(\Delta m)/dt]_{\max}$ przypisana jest do szybkości przesuwu wiązki w przedziale 250–320 mm/min.

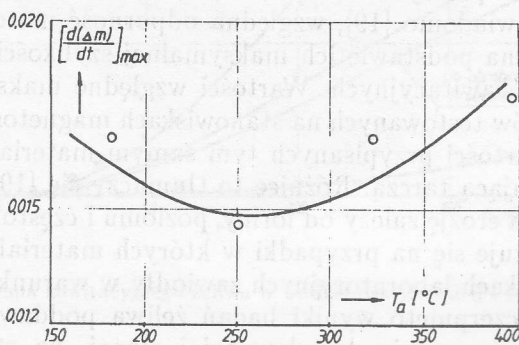
Jak już nadmieniono, odpuszczanie jest zabiegiem szczególnie korzystnym po hartowaniu laserowym. W wyniku tego zabiegu można zmniejszyć szybkość niszczenia stali X20Cr13V o około 20÷30% w stosunku do szybkości niszczenia po hartowaniu bez odpuszczania. Jak wykazały badania próbek odpuszczanych w różnych warunkach (rys. 14), temperatura odpuszczania powinna mieścić się w granicach od 220 do 280° C. W tym przedziale temperatur odpuszczanie wywiera najbardziej korzystny wpływ na odporność stali chromowej poddawanej działaniu kawitacji wibracyjnej.

3. Ocena skuteczności obróbki laserowej na podstawie badań obcych

W celu porównania wyników badań własnych z wynikami badań obcych posłużono się dwoma przykładami z dostępnej literatury [12,20]. I tak z [12] wynika, iż obróbka różnych stopów żelaza laserem powoduje wzrost ich odporności na działanie kawitacji w stopniu niejednakowym. Spośród badanych stopów tj. żeliwa szarego, stali węglowej i niskostopowej oraz stali nierdzewnej, o strukturze martenzytycznej, najlepszą skuteczność obróbki laserem uzyskano dla tego

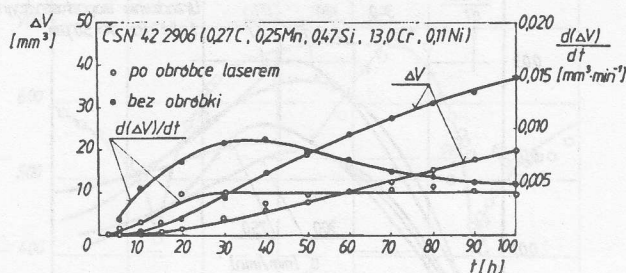


Rys. 13. Szybkość niszczenia stali X20Cr13V w zależności od szybkości przesuwu wiązki promieniowania lasera KATUN a – krzywe szybkości niszczenia, b – krzywa maksymalnych szybkości niszczenia



Rys. 14. Wpływ temperatury odpuszczania, po hartowaniu laserowym, na maksymalną prędkość niszczenia stali X20Cr13V

ostatniego stopu.



Rys. 15. Przebieg niszczenia kawitacyjnego stali chromowej SN 122906, w wodzie destylowanej o temperaturze 40°C, przed i po obróbce laserem (wyniki badań Instytutu SIGMA [10] na stanowisku z wirującą tarczą, przy szybkości obwodowej około 60 m/s)

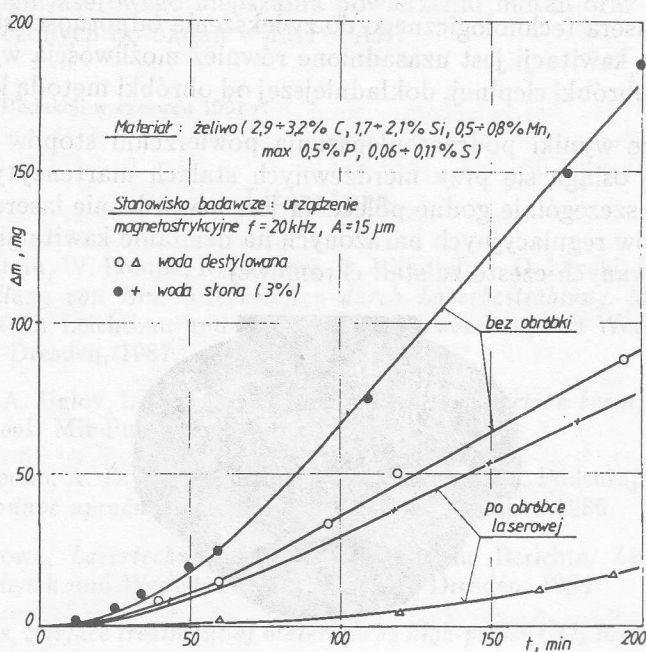
Na rysunku 15 zamieszczono wyniki badań próbek ze stali SN422906 (2H13). Naniesione krzywe odnoszą się do próbek nieobrabianych cieplnie i obrabianych za pomocą lasera o mocy 2,5 kW. Badania erozyjne przeprowadzono na stanowisku z wirującą tarczą, a więc w warunkach zbliżonych do warunków, w których występuje kawitacja przepływowa. Uzyskane wyniki wskazują m.in. na fakt, iż na skutek utwardzenia powierzchni próbek maksymalna szybkość ich niszczenia zmalała ponad dwukrotnie (o około 55%). Powyższe ustalenia potwierdzają w zasadzie wyniki badań własnych; odporność próbek hartowanych laserowo jest wyraźnie większa od odporności próbek nie poddanych temu zabiegowi. Różnice między wynikami badań własnych i obcych dotyczą skuteczności obróbki laserowej. Jak wynika z porównania wartości liczbowych zawartych w tabeli 1 z przebiegiem krzywych zamieszczonych na rysunku 11, badania własne wskazują na większą skuteczność hartowania laserowego aniżeli badania obce [12]. Jedną z przyczyn jest niewątpliwie różnica w sposobie testowania próbek. Podczas badań własnych posługiwano się urządzeniem magnetostrykcyjnym (kawitacja wibracyjna) natomiast podczas badań opisanych w [12] – stanowiskiem z wirującą tarczą (kawitacja przepływowa). Jak wiadomo [19], względna odporność materiałów na działanie kawitacji, oceniana na podstawie ich maksymalnej szybkości niszczenia, jest zależna od warunków kawitacyjnych. Wartości względne maksymalnych szybkości niszczenia materiałów testowanych na stanowiskach magnetostrykcyjnych są z reguły większe od wartości przypisanych tym samym materiałom testowanym na stanowiskach z wirującą tarczą. Różnice te tłumaczy się [19] tym, że odporność danego materiału na erozję zależy od formy, poziomu i częstotliwości obciążeń kawitacyjnych. Wskazuje się na przypadki w których materiały wykazujące dobrą odporność w warunkach laboratoryjnych zawiodły w warunkach rzeczywistych.

Z pracy [20] zaczerpnięto wyniki badań żeliwa poddanego działaniu kawitacji wibracyjnej w wodzie destylowanej i słonej, na stanowisku magnetostrykcyjnym. Wyniki te, przedstawione w formie krzywych erozji całkowitej (rys. 16), wskazują z jednej strony na osłabienie niszczenia kawitacyjnego żeliwa wskutek obróbki laserowej, z drugiej zaś na nasilenie destrukcyjnych procesów

kawitacyjno-korozyjnych w przypadku zasolenia wody.

Ostatecznie autorzy ustalili, iż:

- obróbka laserowa wydłuża okres inicjacji erozji żeliwa w wodzie destylowanej; wykazano, iż po obróbce laserowej następuje 2, 3- krotne wydłużenie okresu inicjacji erozji w stosunku do czasu inicjacji bez takiej obróbki,
- obróbka laserowa zmniejsza szybkość erozji kawitacyjnej żeliwa w wodzie destylowanej w większym stopniu aniżeli w wodzie słonej; przy 3% zawartości soli w wodzie szybkość erozji maleje prawie dwukrotnie a w wodzie destylowanej ponad trzykrotnie, w stosunku do szybkości erozji żeliwa nieobrobionego cieplnie,
- zasolenie wody zwiększa szybkość niszczenia żeliwa w stanie dostarczenia (bez obróbki cieplnej) dwukrotnie, a po obróbce laserem prawie czterokrotnie.



Rys. 16. Przebieg niszczenia kawitacyjnego żeliwa w wodzie destylowanej i słonej przed - i po obróbce laserem wg [20]

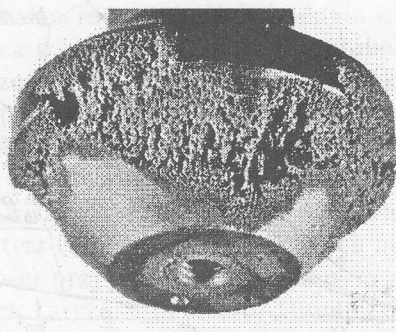
Ostatecznie należy stwierdzić, iż mimo różnic w ocenie skuteczności obróbki laserowej, wyniki badań własnych i obcych wskazują na jej korzystny wpływ na odporność stopów żelaza na działanie kawitacji i na możliwość jej wykorzystania

dla zapobiegania lub zmniejszenia erozji kawitacyjnej. Ujawnione różnice między ocenami należy przypisać w pierwszym rzędzie różnicom w testowaniu próbek materiałów, a więc różnicom w sposobie generowania kawitacji i między wartościami parametrów charakteryzujących kawitację.

4. Uwagi końcowe

Na podstawie wyników badań własnych i obcych wysnuto wnioski następujące:

- a) Hartowanie powierzchniowe stali X20Cr13V (2H13) za pomocą lasera powoduje kilkakrotny wzrost odporności tego stopu na działanie kawitacji, w stosunku do jego odporności przed tym zabiegiem. Szczególnie korzystne jest hartowanie z odpuszczaniem. Hartowanie (utwardzanie) laserowe stali X20Cr13V jest skuteczniejsze od hartowania tej stali metodą konwencjonalną.
- b) Użycie lasera technologicznego do zwiększenia odporności stopów żelaza na działanie kawitacji jest uzasadnione również możliwością wykonywania dokładnej obróbki cieplnej, dokładniejszej od obróbki metodą konwencjonalną.
- c) Najlepsze wyniki podczas ulepszania powierzchni stopów żelaza techniką laserową osiąga się przy nierdzewnych stalach martenzytycznych. Z tego względu szczególnie godne polecenia jest utwardzanie laserowe powierzchni elementów regulacyjnych narażonych na działanie kawitacji (patrz rys. 17), wykonywanych często ze stali chromowej.



Rys. 17. Tłoczek zaworu ze stali chromowej uszkodzony wskutek kawitacji.

- d) Choć hartowanie powierzchniowe wydłuża okres inicjacji zniszczeń i zmniejsza szybkość erozji, to jednak po zniszczeniu warstwy utwardzonej (o podwyższonej odporności na działanie kawitacji) rozpoczyna się okres niszczenia wzmożonego. W związku z tym praktyczne zastosowanie hartowania

powierzchniowego stopów żelaza należałoby ograniczyć do przypadków zapobiegania erozji występującej pod wpływem działania kawitacji o natężeniu umiarkowanym. Wartość tego natężenia, jako natężenia progowego, powinna być ustalona doświadczalnie.

- e) Dalsze badania nad zastosowaniem technologii laserowej do podwyższania odporności stopów żelaza na kawitację należy uznać za celowe, choćby z powodu ograniczeń wskazanych w punkcie d). Szczególnie godne polecenia są badania z laserem o większej mocy (np. 5 kW), dającym ślad o dużej szerokości (np. 25 mm).

Autorzy składają tą drogą podziękowanie doktorowi Berndtowi Brennerowi z Centralnego Instytutu Fizyki Ciała Stałego i Badań Materiałowych AN NRD (Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstofforschung, AdN DDR) za wkład wniesiony w uzyskanie opisywanych tu wyników. To właśnie Dr B. Brenner zainicjował program współpracy z Instytutem Maszyn Przepływowych PAN, a następnie – przez cały czas trwania tej współpracy – był odpowiedzialny za rozwój technologii laserowego ulepszania powierzchni metali oraz przygotowanie próbek przeznaczonych do badań w IMP PAN.

Praca wpłynęła do Redakcji w czerwcu 1991 r.

Literatura

- [1] W. Reitzenstein, W. Pompe, B. Brenner, B. Winderlich, D. Lepski, R. Franke, *Oberflächenveredlung von Eisenwerkstoffen durch Laserbestrahlung*. Mitteilungen aus dem Institut für Leichtbau und ökonomische Verwendung von Werkstoffen. Bd. 26 (1987), H.3, Dresden, 1987.
- [2] N. Rykalin, A. Uglov, I. Zuer, A. Kokora, *Laser and electron beam material processing. Handbook*. Mir Publishers, Moscow 1988.
- [3] V. S. Kovalenko, A. D. Verchotutov, L. F. Golovko, I. A. Podcernjaeva, *Lazernoe i elektroerozionnoe upročnenie materialov*. "Nauka", Moskva 1986.
- [4] Praca zbiorowa, *Lasertechnologie*. Wissenschaftliche Berichte. Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstofforschung. H. 26, Dresden, 1984.
- [5] R. Dekumbis, *Surface treatment of materials by high-power CO₂ lasers*. Sulzer Techn. Rev. No 3, 1986, pp. 24-28.
- [6] B. Gireń, *Wyniki badań wpływu plazmy ciągłego wyładowania optycznego na strukturę i własności mechaniczne warstw powierzchniowych stali węglowych i stopowych*. Opr. IMP PAN nr 305/90.
- [7] B. Brenner, *Wyniki nieopublikowane* (1989).
- [8] B. Winderlich, B. Brenner, *Zur Dauerschwingverhalten vom laserstrahlgehärteten Stahl C70W2*. Härtereitech. Mitt. 43, 1988, 229-235.

- [9] W. Storch, B. Brenner, K.-R. Schulze, *Anwendung von Laser-und-Elektronenstrahl-technologien im Turbinenbau*. Schweißtechnik. Bd.38, H.12, 1099, 551-553.
- [10] B. Brenner, *Informacja prywatna* (1990).
- [11] *Laser-Oberflächenhärtung*. Erosionsschutz für Dampfturbinen-Schaufeln. (VE Kombinat Kraftwerksanlagenbau, Berlin 1988 (materialy reklamowe).
- [12] M. Hrabovsky, A. Koutny, S. Urbanec, *Effect of Laser Transformation Hardening of Steels and Cast Iron Surfaces on their Cavitation Erosion Resistance*. Proc. of the Conf. on Hydraulic Machinery, Turboinstitut, Ljubljana 1988.
- [13] H. H. Piltz, *Werkstoffzerstörung durch Kavitation*. VDI-Verlag, GmbH, Düsseldorf, 1966.
- [14] F. G. Hammitt, Y.C. Huang, T.M. Mitchell, *Discussion*. Trans. of the ASME, J. of Basic Eng., Vol. 92, Ser. D, No 3, September, 1970, pp. 573-576.
- [15] T. Krzysztofowicz, *Sposoby zwiększania odporności materiałów konstrukcyjnych na niszczące działanie kawitacji*. Prace Inst. Maszyn Przepl., z. 67/68, PWN Warszawa-Poznań, 1975.
- [16] A. Gollnau, *Badania kawitacyjne stali chromowej utwardzonej promieniem laserowym. Część I*. Oprac. Inst. Maszyn Przepl. PAN, nr arch. 150/89, Gdańsk, 1989.
- [17] A. Gollnau, T. Krzysztofowicz, K. Steller, J. Steller, *Vergleich zwischen der Schwingkavitations-Beständigkeit vom räumlich und oberflächengehärteten Chromstahl*. Kurzfassung des IMP PAN – Internes Berichtes Nr 283/89, Gdańsk, 1989.
- [18] A. Gollnau, *Badania kawitacyjne stali chromowej utwardzanej promieniem laserowym wraz z analizą metalograficzną. Część II*. Oprac. Inst. Maszyn Przepl. PAN, nr arch. 282/90, Gdańsk, 1990.
- [19] K. Steller, T. Krzysztofowicz, *Badanie odporności materiałów na erozję metodą przepływową, wibracyjną i uderzeniową*. Prace Inst. Maszyn Przepl., z. 75, PWN Warszawa-Poznań, 1978.
- [20] W. J. Tomlinson, J. H. P. C. Megaw, A. S. Bransden, M. Girardi, *The Effect of Laser Surface Melting on the Cavitation Wear of Grey Cast Iron in Distilled and 3% Salt Waters*. Wear, Vol. 116, 1987, pp. 249-260.

Cavitation Resistance of Laser Hardened Chromium Steel

Summary

Results of experimental tests proving laser techniques applicability to increase cavitation resistance of iron alloys, and especially that of chromium steel, are presented. Test samples have been delivered by the Central Institute of the Solid State Physics and Material Research in Dresden and the tests have been conducted at the Institute of Fluid-Flow Machinery, Polish Academy of Sciences, Gdańsk. Results prove a significant increase of the X20Cr13V steel resistance to vibrative cavitation due to surface hardening by means of a CO₂ laser of 1050 W output power. The most desirable laser beam pass velocities and the optimum temperature of post-hardening tempering have been also established.

Стойкость хромистой стали на действие кавитации после лазерного упрочнения

Резюме

В статье представлены результаты опытных исследований указывающих на пригодность лазерной техники для увеличения стойкости сплавов железа, а особенно хромистой стали, на действие кавитации.

Образцы для испытаний поставил Центральный Институт Физики Твердого Тела и Исследований Матерялов в Дрезне. Испытания были выполнены в Институте Польской Академии Наук в Гданьске. Эти последние показали на четкое повышение стойкости стали X20Cr13V на действие вибрационной кавитации по причине ее поверхностного упрочнения лазером CO₂ мощностью 1050 Вт. В результате испытаний установлены между прочим желательные скорости перемещения лазерного пучка, а также оптимальная температура отпуска после лазерной закалики.

Morphological Studies of Electrodynamit Spraying of Water

Electrodynamit spraying of liquids is caused by the electric force applied to the surface of liquid. The results of the spraying of liquids at the present state are: control the liquid surface and the modes of spraying are observed. Distilled water was used as the test medium. The water was forced through a small capillary connected to a high dc voltage. The microscopic observations of this jet in the spraying liquid reveal a number of phenomena which have previously not been reported.

1. Introduction

The spraying of liquids employing electric forces has been known since the first observations of Hove in 1745 [1,2]. The results of his experiments have been forgotten for more than a century, and the phenomenon rediscovered in 1881 by Rayleigh [3], who determined the instability criterion for charged liquid droplets. Zelazny in 1917 [4] established the criterion for instability of an electrified liquid at the tip of a capillary. Many years later Vonnegut and Weibauer [5] considered the initial and final states of the spraying process, and using the energy minimization principle predicted the most probable charge to mass ratio of the produced droplets. Uyeda in 1930 [2] considered the electrical forces causing instabilities of the liquid surface as arising from stresses in the dielectric liquid. Taylor in 1964 [6,7] predicted theoretically the conical shape of the apex of liquid jet emerging from a capillary. Shoney and Michelson in 1968 [8] found the conditions which should be satisfied by the liquid to be sprayed effectively.

In the last two decades a number of papers have been published on this subject. However due to the numerous parameters such as liquid flow rate, conductivity, dipole moment, permittivity, surface tension, viscosity, surrounding gas pressure, dielectric constant, diameter of a capillary, etc., most of the influencing the disruption process, the results of liquid spraying are different as reported in different papers. The differences arise mainly in the liquids of conductivity in an intermediate range (i.e. from 10^{-10} to 10^{-6} Ohm-cm) and in particular in the distilled