

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

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

61

WARSZAWA—POZNAN 1973

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych
w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględ-
nieniem 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 machinery

KOMITET REDAKCYJNY - EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER - REDAKTOR - EDITOR
JÓZEF ŚMIGIELSKI · ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE
Instytut Maszyn Przepływowych PAN, 80-952 Gdańsk
ul. Gen. J. Fiszer 14, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1973

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 410+90 egz.	Oddano do składania 22 VIII 1972 r.
Ark. wyd. 9,0. Ark. druk. 7,5	Podpisano do druku 14 III 1973 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 62 g	Druk ukończono w marcu 1973 r.
Nr zam. 554/128	D-4/155. Cena zł 27,-

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

ZBIGNIEW KRÓLIKOWSKI, TADEUSZ KRZYSZTOFOWICZ

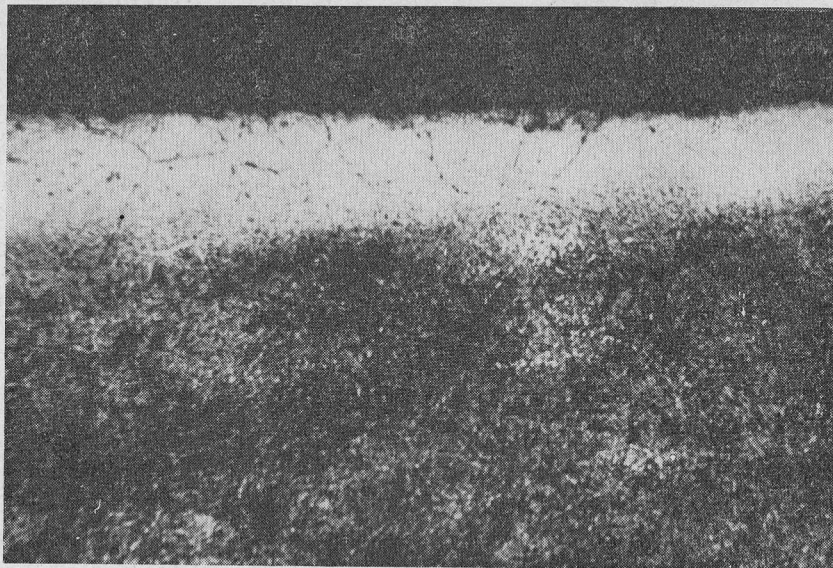
Gdańsk

Przyczyny odwęglania łopatek turbin parowych ze stali 2H13 nagrzewanych płomieniem acetylenowo-tlenowym do lutowania twardego

Przedstawione badania pozwalają wnioskować, że przyczyną odwęglania jest przede wszystkim chemiczne oddziaływanie płomienia palnika. Analizowana jest także możliwość zastosowania innego źródła ciepła, które nie powodowałoby odwęglania.

1. Wstęp

W poprzednim artykule [1] przedstawiono wyniki badań łopatek turbin parowych, wykonanych ze stali 2H13, na których stwierdzono pęknięcia w sąsiedztwie połączeń lutowanych. Występujące zmiany strukturalne pozwoliły na postawienie tezy, że przy-



Rys. 1. Trawiono chlorkiem żelaza, pow. 250×. Odwęglona struktura łopatki turbiny parowej ze stali 2H13. Na powierzchni warstwa ferrytu $\alpha(\delta)$, głębiej martenzyt niskowęglowy z węglkami

czyną pęknięć było intensywne odwęglenie powstałe na powierzchni nagrzanej palnikiem (rys. 1). Studzenie łopatek odwęglonych spowodowało powstanie naprężeń rozciągających w wierzchniej warstwie ferrytu, które mogły doprowadzić do pęknięć.

Celem niniejszej pracy jest ustalenie przyczyn wywołujących całkowite odwęglenie na powierzchni łopatek aż do powstania warstwy ferrytu $\alpha(\delta)$.

Po przeanalizowaniu warunków lutowania, a przede wszystkim temperatury nagrzewania i rodzaju środowiska działającego, wykonano próby nagrzewania w podobnych warunkach, dla uzyskania struktur jak po lutowaniu twardym. W wyniku odtworzenia warunków procesu lutowania stwierdzono pewne błędy technologiczne przy wykonaniu przebadanych fragmentów wirników turbin parowych.

2. Analiza warunków lutowania łopatek

Łopatki badane [1], wykonane ze stali 2H13, zostały połączone drutami tłumiącymi za pomocą lutowni srebrnego. Stal ta według PN-66/H-86020 zaliczana jest do stali nierdzewnych. Jest ona samohartowna [3] i po chłodzeniu na powietrzu posiada strukturę martenzytyczną. W warunkach pracy, najkorzystniejszy jest sorbit, uzyskany po odpuszczeniu w temperaturze 600 - 700°C. Struktura ta jest trwała w temperaturach niższych od temperatury odpuszczenia, dlatego też stal 2H13 jest uważana za żarowytrzymałą do około 700°C. Wysoka zawartość chromu powoduje żaroodporność do 800°C [2].

Nagrzewanie do lutowania przeprowadzono płomieniem acetylenowo-tlenowym. Przyjęto technologię lutowania taką, aby nie dopuścić do przemiany alotropowej w materiale łopatek; temperatura nagrzania winna więc być niższa od $A_{c1} = 800$ do 820°C [1, 2], dlatego dobierano lutowie o temperaturze topnienia poniżej A_{c1} .

Badanie metalograficzne na przekroju łopatek wykazało jednakże miejscami strukturę stali zahartowanej, a nawet przegrzanej, co świadczy dobitnie o przekroczeniu temperatury końca austenitizacji, tj. $A_{c3} = 950$ do 980 °C [1, 2], szczególnie w cienkich przekrojach i silniej nagrzanych miejscach powierzchni. W temperaturze 800°C, powyżej której stal 2H13 przestaje być żaroodporna, powietrze mogło już wywołać odwęglenie łopatek; należy tu jednak zwrócić także uwagę na oddziaływanie płomienia acetylenowo-tlenowego.

2.1. Wpływ powietrza na odwęglanie stali 2H13

Opierając się na schemacie utleniania stali przedstawionym przez Mrowca i Werbera [5, 6], a uzupełnionym przez Królikowskiego [7], można przyjąć, że przy wygrzewaniu w atmosferze utleniającej poniżej 800°C, powstaje cienka i szczelna warstwa tlenków, przede wszystkim magnetytu i spinelu [4], która stanowi zaporę przed działaniem utleniającego ośrodka. W przypadku warstwy szczelnej i ściśle przylegającej do podłoża nie następuje wypalanie węgla, ze względu na brak wolnych prze-

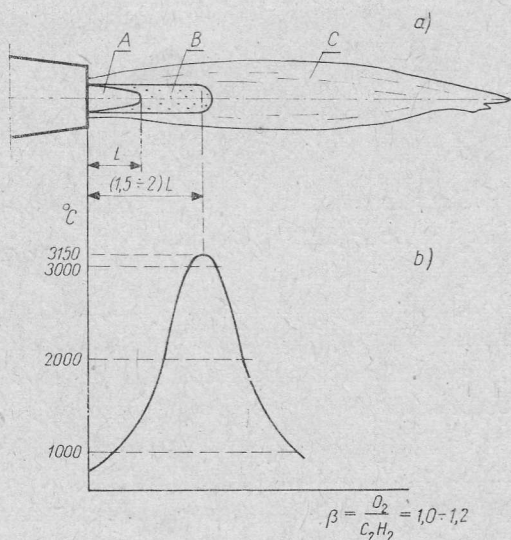
strzeni, w których mógłby zbierać się gazowy produkt utleniania węgla, mianowicie mieszanina $\text{CO} + \text{CO}_2$ [5, 7].

Atomy węgla ze strefy utlenionej stali muszą więc przemieszczać się w głąb materiału, wzbogacając nawet nieco w węgiel warstwę przyległą do zgorzeliny. Przekroczenie temperatury 800°C , powyżej której prawdopodobnie następuje przemiana magnetytu (chromowego) w wustyt (chromowy), wywołuje przyspieszenie dyfuzji jonów żelaza przez warstwę tlenków oraz skłonność do wytwarzania w zgorzelinie por i pęknięć, w których już mogą zbierać się tlenki węgla. W tych warunkach możliwe jest odwęglanie powierzchni stali.

Czynnikiem, który musi być wzięty pod uwagę jest tu jednak czas. Dla uzyskania wyraźnego odwęglania, jakie obserwowane było w pracy poprzedniej [1] wydaje się, że przy oddziaływaniu wyłącznie powietrza, konieczny byłby czas rzędu godzin; na pewno jednak tak długo łopátka nie była wygrzewana przy lutowaniu. Wydaje się więc, że większe znaczenie dla odwęglania mogła mieć atmosfera płomienia acetylenowo-tlenowego.

2.2. Wpływ płomienia acetylenowo-tlenowego na odwęglanie stali 2H13

Płomień acetylenowo-tlenowy daje się podzielić na trzy strefy [8, 9]: jądro, stożek i żagiew (kitę) (rys. 2a). Każda z tych stref wykazuje inny charakter chemiczny, a mianowicie:



Rys. 2. Strefy płomienia gazowego dla $\beta = 1,0 - 1,2$ i rozkład temperatur

$$\beta = \frac{Q_2}{C_2 H_2} = 1,0 - 1,2$$

jądro, gdzie występuje mieszanina C_2H_2 i O_2 — ogólny charakter tej części płomienia jest nawęglający;

stożek — mieszanina $\text{CO} + \text{H}_2$ o charakterze obojętnym;

żagiew (kita) — mieszanina $\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ o charakterze utleniającym.

Wielkość poszczególnych stref można regulować przez dopływ gazów do płomienia [8, 9]. W wyniku tego można uzyskać przeważający charakter płomienia: obojętny (zwany też „normalnym”), nawęglający lub utleniający.

Praktycznie dla uzyskania płomienia „obojętnego” zaleca się stosunek gazów:

$$\beta_{C_2H_2} = \frac{O_2}{C_2H_2} = 0,9 \div 1,2.$$

Dla takiego stosunku gazów powstaje płomień, którego schemat i rozkład temperatur przedstawiono na rys. 2.

Do spawania wykorzystuje się środkową – najgorętszą, obojętną część płomienia, zaś do lutowania raczej zewnętrzną – utleniającą, gdyż temperatura jej jest znacznie niższa i umożliwia nagrzanie przedmiotu do lutowania bez obawy przegrzania. W takich warunkach jednak należy liczyć się z chemicznym oddziaływaniem żagwi na materiał lutowany i lutowie.

W miarę oddalania się od strefy środkowej płomienia, zarówno równoległe jak i prostopadłe od jego osi, wzrasta ilość gazów utleniających (CO_2 i H_2O), przez co ogólny charakter płomienia staje się coraz bardziej utleniający. Określenia odnoszące się do całego płomienia (utleniający, redukujący – nawęglający) są więc mylące, gdyż np. jądro zawsze działa redukująco, a żagiew – utleniająco. Jedynie wielkość względna tych stref ulega zmianom, natomiast ich charakter pozostaje.

3. Badania własne

3.1. Cel, zakres i warunki badań

Bezpośrednim celem przeprowadzonych badań było uzyskanie odwęglonej struktury ferrytycznej, jaką stwierdzono po lutowaniu twardym łopatek turbin parowych (rys. 1) [1].

Uzyskanie podczas badań takiej struktury świadczy o „zrekonstruowaniu” w warunkach laboratoryjnych cyklu zjawisk zachodzących przy lutowaniu.

W badaniach ograniczono się do stali 2H13 – materiału łopatek, na których zaobserwowano intensywne odwęglenie [1].

Aby stwierdzić, który z przedstawionych czynników (powietrze, czy płomień palnika) zadecydował o odwęgleniu, nagrzewanie przeprowadzono: a) w piecu i b) za pomocą palnika acetylenowo-tlenowego. Przy nagrzewaniu niektórych próbek zastosowano dodatkowo jako topnik boraks.

Próby wygrzewania w piecu przeprowadzono na próbkach wyciętych z łopatki turbiny parowej, zaś nagrzewania palnikiem dokonano na przekroju łopatki. Przy wygrzewaniu w piecu przyjęto temperatury 700 - 1100°C i czas 0,5 - 1,5 h, natomiast dla nagrzewania palnikiem temperatur nie dało się określić, czas zaś wynosił 20, 40 i 60 s.

Temperatura przy nagrzewaniu palnikiem zależała od różnych czynników, a mianowicie:

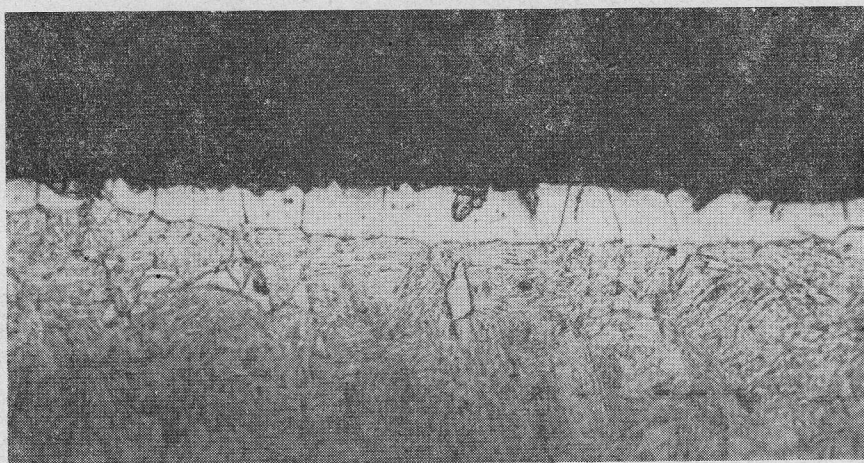
- a) odległości końcówki palnika od powierzchni łopatki,
- b) współczynnika β płomienia,
- c) grubości łopatki w miejscu nagrzewania (pojemności cieplnej),
- d) czasu działania płomienia.

Przyjęto taki sposób nagrzewania palnikiem, aby wyeliminować wpływ czynników a), b) i c). Mimo wpływu tylko czynnika d) nie określono rozkładu temperatur po nagrzewaniu w sposób bezpośredni, ale wnioskowano o nim na podstawie uzyskanej struktury metalograficznej. W dalszych badaniach zmieniano także wielkość współczynnika β płomienia.

3.2. Wyniki badań metalograficznych

Z próbek wygrzewanych w piecu i nagrzewanych palnikiem acetylenowo-tlenowym wykonano zglądy metalograficzne na powierzchniach nagrzewanych oraz na przekrojach.

Badania metalograficzne próbek wygrzewanych w piecu w temperaturach poniżej 900°C nie wykazały odwęglania, a dopiero po przekroczeniu 900 do 1100°C dla czasów wyżarzania 0,5 i 1,0 godziny, stwierdzono na powierzchniach wzbogacenia w ferryt (rys. 3).

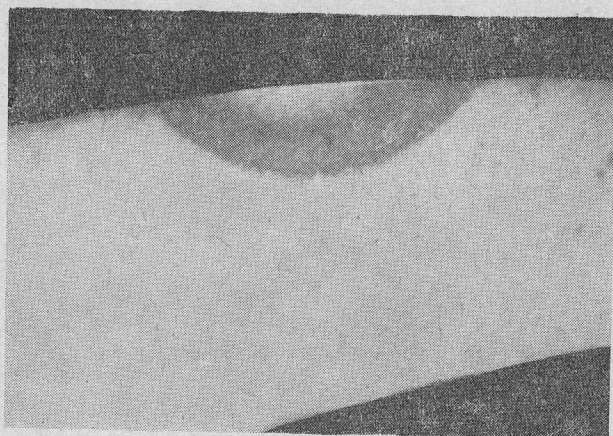


Rys. 3. Trawiono chlorkiem żelaza, pow. $250\times$. Próbką odwęgloną w piecu (temp. 950° , czas 1,5 h). Na powierzchni ferryt α (δ), głębiej martenzyt niskowęglowy

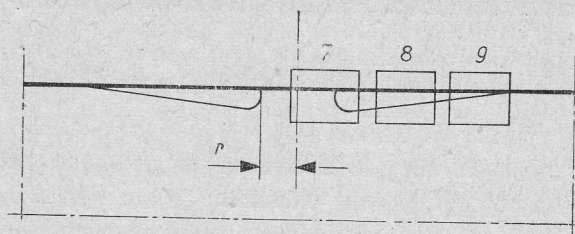
Na zglądach wykonanych na powierzchniach nagrzewanych płomieniem palnika acetylenowo-tlenowego, po wytrawieniu chlorkiem żelaza, już okiem nieuzbrojonym stwierdzono obecność charakterystycznych pierścieni o różnych szerokościach (rys. 4), w których badania makroskopowe wykazały istnienie znacznego odwęglania.



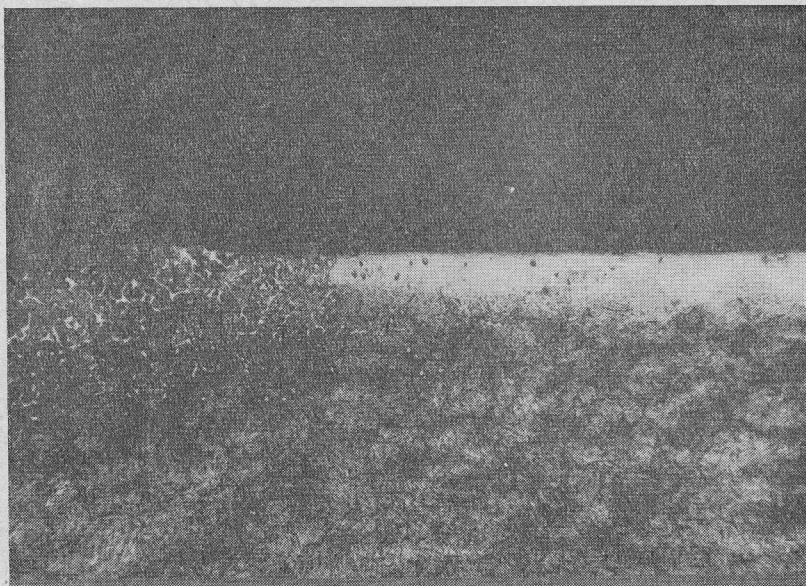
Rys. 4. Makroskopowy obraz powierzchni nagrzanej palnikiem po wytrawieniu chlorem żelaza, pow. $3\times$. Ciemne miejsca – obszar bezpośredniego oddziaływania stożka płomienia, wokół – strefa koncentryczna oddziaływania żagwi, obszar odwęglony



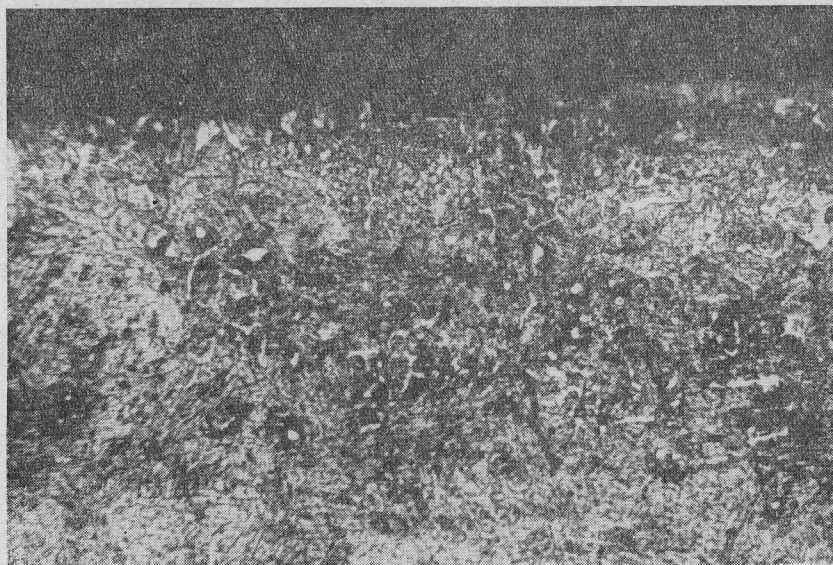
Rys. 5. Makroskopowy obraz przekroju łopatki w osi płomienia, pow. $3\times$. Wyraźna zaciemniona strefa cieplnego oddziaływania palnika. Na powierzchni łopatki (trudne do zauważenia) dwa nie wytrawione fragmenty odwęglone w obszarze oddziaływania żagwi



Rys. 6. Schemat strefy odwęglonej na powierzchni łopatki



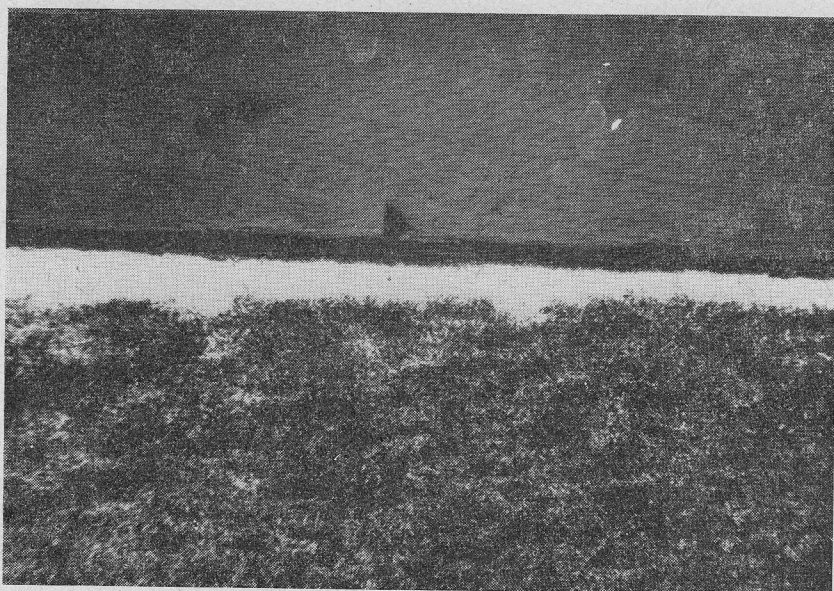
Rys. 7a. Trawiono chlorkiem żelaza, pow. $100\times$. Zdjęcie fotograficzne z miejsca „7” na rys. 6. Pogranicze oddziaływania stożka — widoczna siatka węglików jako efekt nawęglania, dla żagwi — warstwa ferrytu — efekt odwęglania



Rys. 7b. Trawiono chlorkiem żelaza, pow. $250\times$. Szczegół rys. 7a — strefa działania stożka

Na zglądach z łopatki wykonanych wzdłuż osi płomienia, stwierdzono wyraźne oddziaływanie płomienia palnika w postaci obszarów koncentrycznych (rys. 5 i 6). Przy obserwacji pod mikroskopem występuje charakterystyczny rozkład odwęglenia w pewnej odległości od osi płomienia, a więc w obszarze oddziaływania żagwi (rys. 7a, 8, 9a). W strefie oddziaływania stożka obserwuje się natomiast pewne wzbogacenie w węglu (rys. 7a, 7b).

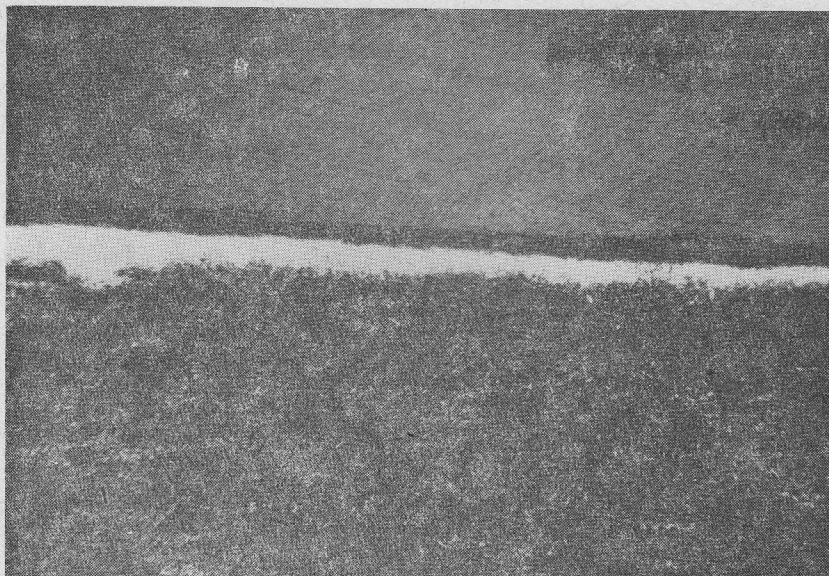
W dalszej odległości od osi płomienia występuje obszar odwęglony o stosunkowo grubej warstwie ferrytu (rys. 7a), która w miarę wzrostu odległości stopniowo się zmniejsza (rys. 8, 9a i b). Schematycznie rozkład struktur przedstawiono na rys. 6.



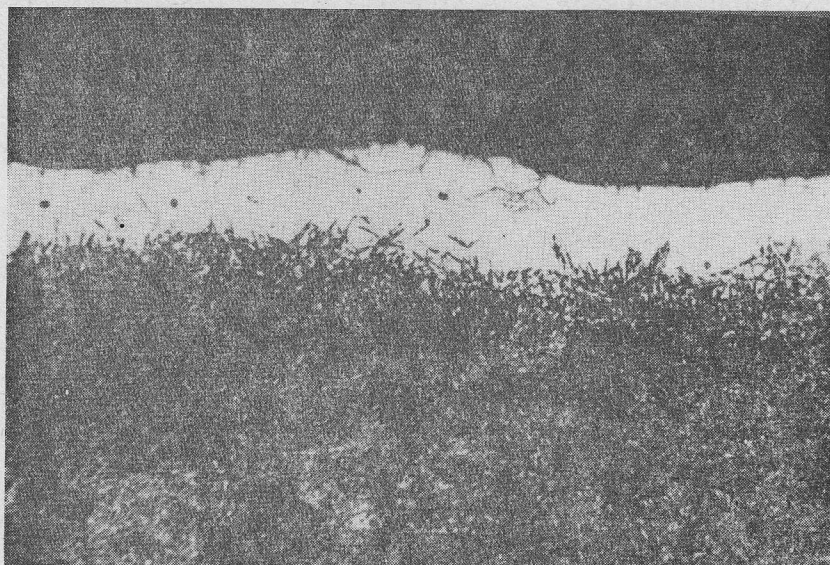
Rys. 8. Trawiono chlorkiem żelaza, pow. $100\times$. Zdjęcie fotograficzne z miejsca „8” na rys. 6 — strefa działania żagwi, warstwa ferrytu o stopniowo malejącej grubości

Odległość brzegu pierścienia odwęglonego od osi płomienia (na rys. 6 — wielkość r) zależała od charakteru płomienia. Dla płomienia o współczynniku $\beta > 1,2$ (tzw. płomień utleniający) wielkość r była niewielka; w miarę zmniejszania β wielkość r wzrastała. Dla próbek nagrzewanych tzw. płomieniem redukującym, tj. przy $\beta < 0,9$, badanie metalograficzne wykazało na powierzchni próbki nadtopienie i strukturę ledeburytną (rys. 6a i b).

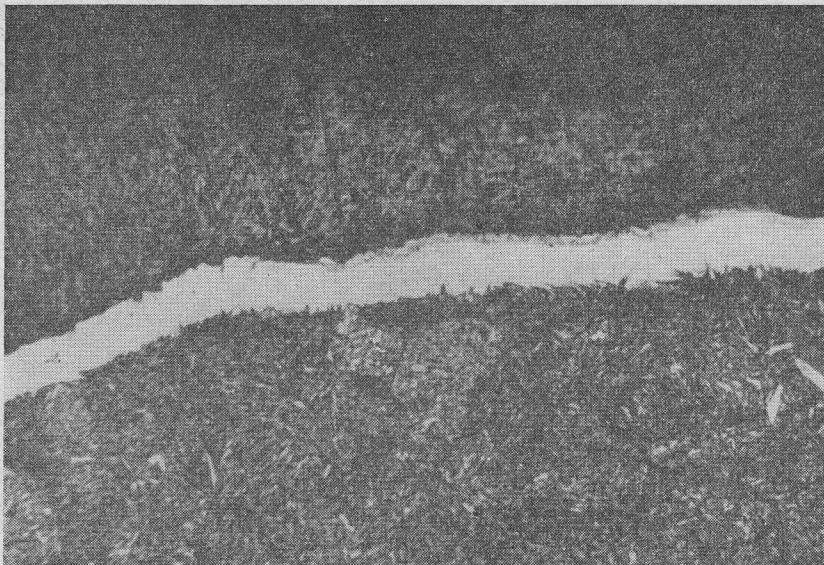
Charakterystyczne dla tego obszaru jest pasmowe występowanie struktur: ledeburyt, ferryt, struktura iglasta martenzytyczna (rys. 10a i b). Struktura zaobserwowana i przedstawiona na rys. 10a i 10b wykazuje skokowe zmiany zawartości węgla. Szczególnie interesujące jest powstanie bogatego w węgiel ledeburytu, z którym bezpośrednio sąsiaduje warstwa ferrytu. Na pierwszy rzut oka wydawałoby się, że węgiel z ledeburytu powinien nasycić ferryt. Analiza przekroju układu Fe—C—Cr przy Cr=13%, na rys. 11 wykazuje, że w wyniku nawęglenia powierzchni nastąpi nadtopienie łopatki, przy czym powinien



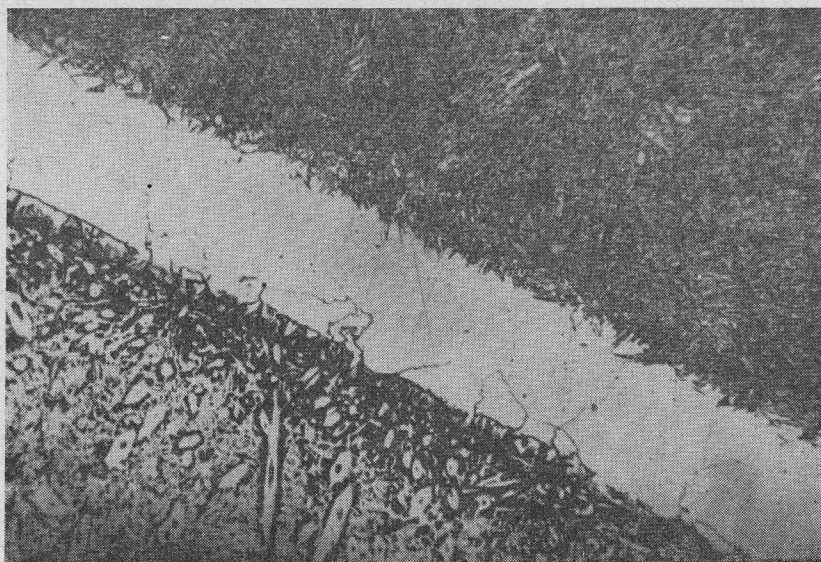
Rys. 9a. Trawiono chlorkiem żelaza, pow. $100\times$. Zdjęcie fotograficzne z miejsca „9” na rys. 6. Opis struktury jak na rys. 8



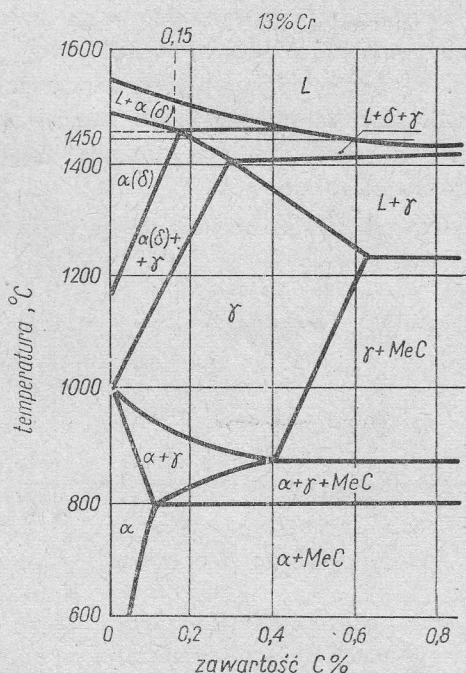
Rys. 9b. Trawiono chlorkiem żelaza, pow. $250\times$. Szczegół rys. 9a — strefa działania żagwi. Pod warstwą ferrytu strefa iglastego martenzytu (częściowo na tle ferrytu), głębiej martenzyt z węglkami



Rys. 10a. Trawiono chlorkiem żelaza, pow. $100\times$. Warstwowa struktura pod obszarem nadtopionym. Na powierzchni ledeburyt, głębiej ferryt, ostro odgraniczający się zarówno od ledeburytu jak i zahartowanego podłoża, a dalej martenzyt



Rys. 10b. Trawiono chlorkiem żelaza, pow. $250\times$. Szczegół rys. 10a. Opis struktury jak wyżej



Rys. 11. Układ pseudodwuskładnikowy
Fe-C—13% Cr [2]

ustalić się stan równowagi między ferrytem niskowęglowym i cieczą bogatą w węgiel (np. dla 1450°C — ferryt ok. 0,15% C, ciecz ok. 0,4% C). Nadmiar węgla z powierzchni nienadtopionej, najprawdopodobniej przechodzi do cieczy (stopionej stali), wynikiem czego jest odwęglanie powierzchni i powstanie warstwy ferrytu $\alpha(\delta)$.

4. Dyskusja wyników

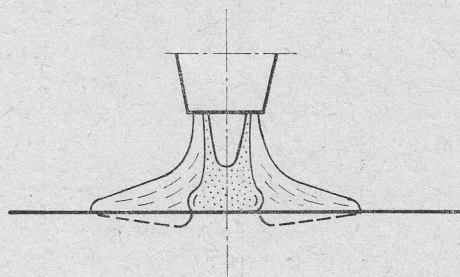
Przeprowadzone badania pozwalają na rozstrzygnięcie, czy odwęglanie obserwowane na łopatkach lutowanych lutowiem srebrnym [1] powstało w wyniku działania powietrza na gorącą powierzchnię łopatki, czy też na skutek oddziaływania płomienia acetylenowo-tlenowego.

Wyrzewanie w piecu elektrycznym w atmosferze powietrza dało wprawdzie odwęgloną warstwę na powierzchni próbki, ale dopiero po 30 minutach wygrzewania w temperaturze powyżej 900°C; tak długi czas oddziaływania temperatury przy lutowaniu nie występuje.

Nagrzewanie płomieniem acetylenowo-tlenowym natomiast, już po 30 sekundach grzania dało strukturę odwęgloną i to niezależnie od charakteru płomienia (utleniającego, obojętnego czy redukującego), a także niezależnie od zastosowania jako topnika boraksu. Pierścieniowy kształt strefy odwęglonej (rys. 4, 5 i 6) pozwala na wnioskowanie, że jest ono wynikiem działania żagwi płomienia, która ma charakter utleniający (rys. 12). W związku z tym, można twierdzić, że nawet bardzo staranne wyregulowanie płomienia, jeżeli czas jego działania będzie długi, nie uchroni przed odwęglaniem w pewnej odległości od osi płomienia.

Przy nagrzewaniu do lutowania należy więc unikać niepotrzebnego przedłużenia nagrzewania, gdyż to prowadzi do podwyższenia temperatury w okolicy złącza, a w przypadku odwęglenia i szybkiego chłodzenia także do powstania naprężeń. Można też postawić tezę, że stosowanie do nagrzewania płomieni, w których spala się jakikolwiek gaz palny (ze względu na obecność żagwi), może doprowadzić do odwęglania miejsca nagrzewanego albo jego sąsiedztwa.

Odwęglanie będzie też funkcją czasu nagrzewania podłoża.



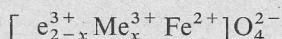
Rys. 12. Oddziaływanie stref palnika na przedmiot nagrzewany

Przy nagrzewaniu płomieniem acetylenowo-tlenowym, dla przeciwdziałania przegrzania materiału, często nagrzewa się żagwią, która nie jest najgorętszą częścią płomienia; ma ona jednak charakter silnie utleniający. Aktywny ośrodek, a więc atmosfera żagwi, zawsze powoduje utlenienie powierzchni, a może także doprowadzić do odwęglania. Działanie tlenków żelaza przedstawia się następująco:

Na żelazie technicznym i stali węglowej do temperatury 570° C wytwarza się warstwa magnetytu ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO} = \text{Fe}_3\text{O}_4$), która chroni stal przed utlenianiem. Po przekroczeniu 570°C, magnetyt przechodzi w wustyt ($\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightleftharpoons 3\text{FeO} + 1/2\text{O}_2$), który nie chroni już przed działaniem utleniającym atmosfery otaczającej, ze względu na pustowężlową budowę sieci FeO [4]. Przedstawiona reakcja ponadto wybitnie uaktywnia działanie tlenu.

W stalach żaroodpornych sytuacja jest podobna. W temperaturach niższych wytwarza się ochronna warstwa magnetytu stopowego i spineli. Te ostatnie powstają w wyniku wymiany części trójwartościowych jonów żelaza przez jony glinu lub chromu (Me^{3+}), które to składniki zwiększają żaroodporność.

Wzór spinelu można przedstawić ogólnie w sposób następujący:



lub $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Al})_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$.

Spinele są trwalsze aniżeli magnetyt i ich przejście w wustyt zachodzi w temperaturach wyższych aniżeli 570°C. Działają więc podobnie jak magnetyt, chroniąc metal przed utlenieniem, w wyniku czego daje się stwierdzić żaroodporność.

Warstwa tlenków i spineli utrudnia lutowanie, ponieważ nie pozwala na bezpośredni kontakt lutowia z podłożem. Zastosowanie boraksu, ożuzlającego tlenki, polepsza zwilżalność powierzchni lutowanej przez stopione lutowie, ale wzmaga odwęglające działanie atmosfery żagwi, która i tak jest bardzo aktywna chemicznie.

Z tego też wynika, że nagrzewanie żagwią powierzchni do lutowania nie jest korzystne.

Od razu nasuwa się tutaj propozycja zastosowania powietrza zamiast tlenu oraz ewentualne zastąpienie acetylenu przez inny gaz palny co obniży temperaturę płomienia. Doprowadziłoby to automatycznie do przedłużenia czasu nagrzewania, a więc i działania żagwi (prawdopodobnie o innym składzie chemicznym) na powierzchnię łopatki. Być może nie spowodowałoby to powierzchniowego odwęglaniu, jednak zachodzenie tego zjawiska nie może być wykluczone.

Na tym tle należy rozważyć inne metody przeciwdziałania odwęglaniu. Najprostszym sposobem byłoby zastosowanie innych metod nagrzewania, np. elektrycznego, oporowego lub indukcyjnego. Jednakże próby lutowania oporowego, przeprowadzone przez autorów, dały na razie wyniki negatywne. Nagrzewanie indukcyjne wydaje się bardzo obiecujące, istnieje jednak trudność techniczna — jak w przestrzeń między łopatkami wprowadzić induktor.

Innym sposobem proponowanym do rozważenia byłoby nagrzewanie powierzchni gorącym strumieniem gazu obojętnego (azot, argon).

Należy także rozważyć sposoby przeciwdziałania odwęglaniu przez odizolowanie od działania płomienia części lutowanych przez warstwę srebra nałożonego elektrolitycznie. Jednakże w ostatnim przypadku — pomijając nawet techniczne trudności — trzeba by rozważyć ekonomikę tego rozwiązania.

Być może jednak, że warstwa srebra umożliwi nagrzewanie oporowe i lepsze powiązanie lutowia z podłożem, a więc ułatwi lutowanie stali antykorozyjnej.

5. Wnioski

Wyniki uzyskane z badań oraz przeprowadzona dyskusja pozwalają na przedstawienie następujących wniosków.

1. Odwęglanie łopatek ze stali 2H13 w czasie lutowania twardego spowodowane jest oddziaływaniem płomienia acetylenowo-tlenowego, a w szczególności żagwi płomienia. Wypalanie węgla na powierzchni stali obserwowano niezależnie od wyregulowania płomienia po dostatecznie długim czasie jego działania na powierzchnię ogrzewaną.

2. Przedłużenie czasu działania płomienia na łopatkę doprowadza do przekroczenia temperatury $A_{c1} = 800 - 820^{\circ}\text{C}$, co oprócz intensywnego odwęglania może wywołać także zahartowanie.

3. Zastosowanie boraksu jako topnika przy lutowaniu uintensywnia odwęglanie, szczególnie w strefie utleniającej płomienia.

4. Przy stosowaniu obecnej technologii lutowania palnikiem acetylenowo-tlenowym należy:

- a) unikać nagrzewania powierzchni lutowanych żagwią płomienia,
- b) nie przedłużać czasu działania płomienia na powierzchnię stali, aby nie nagrzać jej do temperatury powyżej A_{c1} .

5. Dla całkowitego uniknięcia niebezpieczeństwa odwęglania stali 2H13 należałoby:

- a) zmienić stosowaną obecnie technologię na nagrzewanie bezpłomieniowe lub

b) zastosować warstwy chroniące powierzchnię nagrzewaną przed bezpośrednim działaniem płomienia, np. warstwą srebra.

W tym kierunku będą prowadzone dalsze prace.

Praca wpłynęła do Redakcji w kwietniu 1972 r.

Literatura

- [1] Z. Królikowski, T. Krzysztofowicz, *Zmiany strukturalne w łopatkach turbin parowych po lutowaniu twardym*. Prace IMP, z. 56, 1971, s. 101.
- [2] L. Colombier, J. Hochman, *Stale odporne na korozję i stale żaroodporne*. Wyd. „Śląsk”, Katowice 1964.
- [3] I. Famuła, S. Mrowiec, T. Szumański, *Tablice stali jakościowych*. Wyd. „Śląsk”, Katowice 1970.
- [4] T. Drażkiewicz, S. Gębalski, *Żaroodporne powłoki aluminiowe na stali i żeliwie*. PWT, Warszawa 1957.
- [5] S. Mrowec, T. Werber, *Korozja gazowa*. Wyd. „Śląsk”, Katowice 1965.
- [6] S. Mrowec, *Zarys teorii utleniania metali*. Wyd. „Śląsk”, Katowice 1971.
- [7] Z. Królikowski, *Mechanizm odwęglania stali nadeutektoidalnych wygrzewanych w powietrzu w zakresie austenitu*. Zesz. Nauk. Pol. Śl. nr 255, Gliwice 1969.
- [8] D. L. Glizmanienko, G. B. Jewsiejew, *Gazowa swarka i riezka metallow*. Maszgiz, Moskwa 1954.
- [9] L. I. Gawriłow, *Swarka i riezka metallow*. Maszynostrojenije, Moskwa 1968.

Причины обезуглероживания лопаток паровых турбин из стали 2Х13, нагреваемых ацетилено-кислородным пламенем для твердой пайки

Резюме

Во время периодического осмотра паровой турбины обнаружены на некоторых лопатках трещины, которые появлялись вблизи мест пайки с демпфирующими проволоками [1].

Металлографические исследования зон трещин показали закалку и интенсивное обезуглероживание на поверхности лопаток.

Целью настоящей работы является определение причин возникновения пленки феррита $\alpha(\delta)$ на поверхности лопатки, нагретой для твердой пайки. Проведены испытания длительного нагрева в печи при свободном доступе воздуха, а также нагрева ацетилено-кислородной горелкой. Констатируется, что обезуглероживание структуры на поверхности, нагреваемой горелкой (рис. 6—9), похоже структурам на поврежденной лопатке (рис. 1). Обезуглероживание произошло независимо от отрегулирования горелки, что, по мнению авторов, не связано с существованием окисляющей зоны, т. наз. факела (рис. 2 и 12).

В результате длительного нагрева т. наз. восстановительным пламенем на поверхности образца произошло науглероживание, а также поверхностное расплавление и образование ледебурита, а глубже появление ферритной зоны (рис. 10).

На основе полученных результатов и проведенной дискуссии установлено, что при нагреве к пайке пламенем, происходящим от сгорания сжигаемых газов, всегда возникает опасность образования пленки, обезуглероженной вследствие действия окисляющей зоны пламени.

Для того, чтобы не допустить к обезуглероживанию поверхности лопаток при пайке, следовало бы:

- а) применять беспламенный нагрев,
- б) вводить предохраняющую пленку металла, напр. серебра, которое не затрудняя пайки изолирует поверхность от непосредственного действия факела.

The Reasons of Decarbonizing of 2H13 Steel Steam Turbine Blades Heated up with Oxy-Acetylene for Brazing

Summary

It has been stated during the periodical inspection of a steam turbine that some blades display cracks near the places of brazing to the damping wires [1]. A metallographic examination revealed hardening and strong decarbonization of the blade surfaces.

The purpose of this work was to determine the origin of the $\alpha(\delta)$ ferrit layer appearing on the surface of the blade heated up for brazing. Tests of soaking in the furnace with free access of air and heating with an oxy-acetylene burner have been carried out. It has been observed that the surface structures caused by oxy-acetylene heating (figs 6 - 9) are similar to those on the damaged blade (fig. 1). The decarbonization occurred irrespective of the flame adjustment, which — in the author's opinion — is explained by the existence of the oxidizing zone called feather in the flame (figs 2 and 12).

A longer heating up in a reducing flame caused carbonizing, partial melting of the test-piece surface and formation of a ledeburite layer, with a ferrite layer underneath (fig. 10).

After discussing the results obtained it has been stated that during the flame heating for brazing (with combustible gases as the heating agent) there is always a danger of formation of a decarbonized layer due to the oxidizing action of the flame.

In order to avoid surface decarbonizing of the blades during brazing:

- a) flameless heating should be employed,
- b) a protecting metal layer should be applied e.g. a silver one, which, not complicating the brazing process, will isolate the steel surface from direct flame impingement.