

# Napawanie stali stosowanych w energetyce stopami na osnowie niklu

## Pad welding of steels used in power engineering with nickel base alloys

### STRESZCZENIE

W artykule omówiono ogólne wymagania dotyczące wytwarzania ścian szczelnych kotłów do spalania odpadów. Przedstawiono technologię montażowego wykonywania napoin na ścianach oraz sposób pomiaru zawartości żelaza w napoinach. Opracowana technologia gwarantowała uzyskanie założonego poziomu  $Fe < 10\%$ .

### ABSTRACT

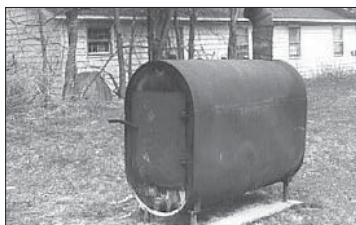
General requirements relating to manufacturing of sheet piling of boilers for wastes combustion was presented. The technology of carrying out pad welds upon walls and measurement method of iron content in the weld pads was discussed. The developed technology guaranteed to reach the assumed level of  $Fe < 10\%$ .

### Wstęp

Żeby zrozumieć, jakie znaczenie ma technologia napawania dla przemysłu energetycznego, trzeba odpowiedzieć na pytanie, czy warto inwestować w prace nad rozwojem projektów kotłów przeznaczonych do spalania śmieci?

Nie jest nowością to, że ludzie spalają śmieci. Robili to od dawna.

**Rys. 1.** „Destruktor” zbudowany w 1874 r. w Nottingham (Anglia). Przykład „nielegalnego”, domowego urządzenia do spalania śmieci [2]



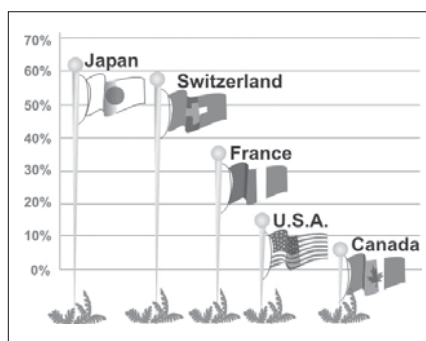
Biorąc pod uwagę, że „efektem ubocznym” spalania śmieci może być energia, np. elektryczna sprawa, że prace nad rozwojem w tym kierunku są uzasadnione, gdyż mamy do czynienia z zamianą nieużytecznej formy materii w użyteczną formę energii. Ze spalania 1 tony śmieci można uzyskać tyle energii, co ze spalania 250 kg węgla. Inne porównanie: spalanie 1 tony śmieci generuje około 525 kWh, jest to wystarczająca ilość energii do ogrzania typowego budynku biurowego przez 1 dzień. Faktem jest, że uzyskanie energii ze spalania śmieci kosztuje więcej niż ze spalania węgla, ale największą zaletą jest możliwość zredukowania od 60 do 90% wielkości wysypisk śmieci i związanych z tym kosztów ich utrzymania [3, 4].

Wiele krajów posiada wyspecjalizowane spalarnie śmieci produkujące przy okazji energię. Wykres na rysunku 2 przedstawia światową czołówkę tych technologii. Japonia spala 62% produkowanych śmieci dlatego, że posiada mało przestrzeni do ich składowania oraz ze względu na niewielką ilość źródeł energii [4].

Największym problemem do rozwiązania jest zapewnienie na właściwym poziomie emisji spalin. Podczas spalania śmieci wydzielają się wiele toksycznych związków, które muszą być zneutralizowane przez wysoce zaawansowany technologicznie system filtrów.

Najbardziej znane zanieczyszczenia powstające podczas spalania śmieci to: dioksyny i furany, dwutlenek węgla, tlenek węgla, rtęć, kadm, ołów, tlenki azotu, pyły i opary związków organicznych oraz gazy kwaśne [5].

Dwutlenek siarki – jest typowy dla kotłów opalanych węglem, natomiast dla kotłów, w których spalane są śmieci większym problemem jest obecność chlorowodoru. Tworzą go chlor i chlorki powstające ze spalania papieru, PVC i soli [5].



**Rys. 2.** Światowi liderzy w pozyskiwaniu energii ze spalania śmieci – pierwsza piątka [4]

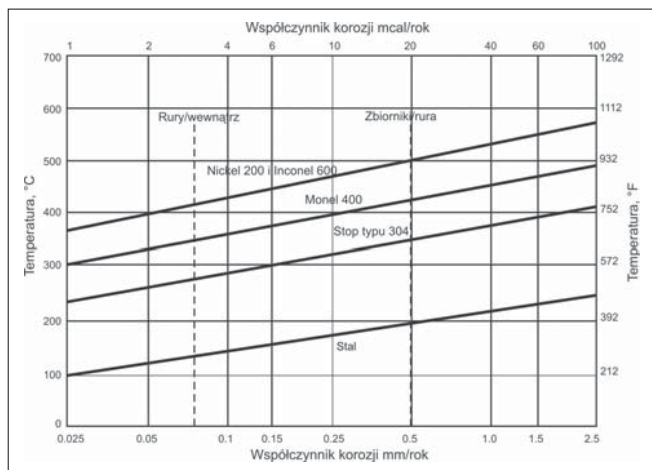
### Materiały stosowane do budowy kotłów WTE<sup>1)</sup>

Chlorowódz jest bardzo aktywnym gazem, wywierającym negatywny wpływ na materiał, z którego zbudowana jest komora paleniskowa kotła.

Z tego właśnie powodu zdecydowano się na wykonanie części paleniskowej kotła z rur kompozytowych lub z rur ze stali węglowej napawanych specjalnym stopem na osnowie niklu typu INCONEL. Stop

*Mgr inż. Jacek Jarosiński, mgr inż. Michał Błaszczyk – Fabryka Kotłów SEFAKO S.A.,  
prof. dr hab. inż. Edmund Tasak – AGH*

<sup>1)</sup> WTE – ang. Waste to Energy – energia z odpadów



Rys. 3. Wykres wspomagający projektowanie urządzeń do pracy w środowisku chlorowodoru [6]

ten jest szczególnie odporny na korozję wżerową i szczelinową (rys. 3).

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykłady rury kompozytowej (dwuwarstwowej) i fragment ściany szczelnej napawanej. W obydwu przypadkach materiał od zewnątrz jest stopem na osnowie niklu, który jest odporny na korozyjne działanie chlorowodoru. W tabeli I podano składy chemiczne materiałów rur i napoin stopu niklowego.



Rys. 4. Rura Sandvik Sanicro 63 [11]



Rys. 5. Fragment ściany rurowej 15Mo3 napawanej stopem niklu, materiałem MT NiCr 625

Tablica I.

| Tabela I    | SKŁAD CHEMICZNY [%] DLA MATERIAŁÓW: |                         |                 |                   |
|-------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------|
|             | Rys. 4                              |                         | Rys. 5          |                   |
|             | Rura Sanicro 63                     |                         | Rura            | Napoina           |
| Pierwiastek | wewnątrz<br>10CrMo9-10<br>1.7380    | zewnątrz<br>2.4856 (Mo) | 15Mo3<br>1.5415 | stopiwo<br>2.4831 |
| Ni          |                                     | 64,6                    | 0,08            | osnowa            |
| Cr          | 3,19                                | 21,4                    | 0,13            | 22                |
| Mo          | 0,49                                | 8,5                     | 0,28            | 9                 |
| Fe          |                                     | 0,99                    |                 | 1                 |
| Mn          | 0,54                                | 0,38                    | 0,68            | 0,2               |
| Si          | 0,33                                | 0,32                    | 0,21            | 0,2               |
| Ti          |                                     | 0,25                    |                 |                   |
| Cu          |                                     |                         | 0,14            |                   |
| Al          |                                     | 0,019                   | 0,01            |                   |
| C           | 0,25                                | 0,012                   | 0,17            | 0,02              |
| Co          |                                     | 0,01                    |                 |                   |
| P           | 0,009                               | 0,005                   | 0,007           |                   |
| S           | 0,021                               | 0,001                   | 0,001           | 0,01              |
| Nb+Ta       |                                     |                         |                 | 3,3               |

Zastosowanie rur kompozytowych, oprócz zalet technologicznych, jest rozwiązaniem bardziej estetycznym, niestety, wciąż bardzo drogim. Stosowanie napawanych paneli ścian gazoszczelnych jest tym bardziej korzystne, że nie ma potrzeby stosowania warstw stopowych na zewnętrznej stronie ścian kotła. Zatem stosowanie technologii napawania jest wciąż uzasadnione ekonomicznie, bo pozwala

zredukować prawie o 50% objętość materiału przeznaczanego na wykonanie warstwy napawanej.

## Wymagania jakościowe dla napoin ze stopów na osnowie niklu oraz możliwe sposoby przeprowadzenia badań

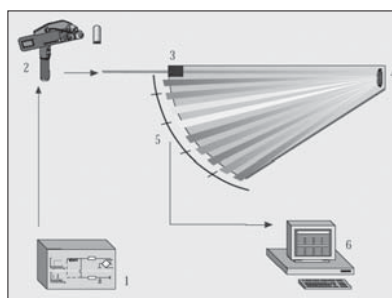
Ze względu na to, że technologia napawania elementów kotłowych na skalę przemysłową jest stosunkowo nowa, nie ma wiele przepisów, które podawałyby podstawowe kryteria, jakie powinny spełniać napoiny. Oprócz wymagań narzuconych przez klienta, często będących wynikiem własnych doświadczeń, można powoływać się na przepis VdTUV-Merkblatt 1166 – „Wytwarzanie i badania napawanych ścian gazoszczelnych przeznaczonych do budowy kotłów”.

Z praktyki wynika, że najważniejszym kryterium, jakie musi spełniać napoina ze stopu na osnowie niklu, to określona zawartość żelaza (Fe) mierzona na jej powierzchni. Zawartość Fe nie może przekraczać 6% w przypadku napoin wykonywanych automatycznie i 10% w przypadku napoin wykonywanych ręcznie. Zaleca się również stosowanie podstawowych materiałów do napawania o zawartości żelaza nie większej niż 1%.

Mimo to, że VdTUV-Merkblatt 1166 nie narzuca aż tak ostrych warunków, specyfikacje techniczne będące, często załącznikami do kontraktu, zmuszają zleceniobiorcę do podjęcia wszelkich działań, by spełnić te wymagania.

Analizę składu chemicznego gotowego wyrobu można prowadzić:

- metodą iskrową (analiza widma),
- metodą rentgenowską.



Rys. 6. Zasada działania przenośnego analizatora metali [7]

Iskrowa metoda badania z zastosowaniem przenośnego analizatora, przedstawiona schematycznie na rysunku 6, polega na optycznej analizie emitowanego widma promieniowania świetlnego. Próbkę materiału ulega odparowaniu na skutek zajarzenia łuku lub wyładowania elektrycznego. Atomy i jony znajdujące się w oparach zostają pobudzone i emitują promieniowanie widzialne. Wyemitowane promieniowanie jest następnie przekazane za pomocą światłowodu do układu optycznego spektrometru, gdzie zostaje rozszczepione na poszczególne składniki widma. Zależnie od długości fali emitowanej, charakterystycznej dla danego pierwiastka, właściwa linia spektrum jest mierzona za pomocą światłoczułych układów CCD [7].

Natężenie promieniowania świetlnego, proporcjonalne do zawartości danego pierwiastka w próbce, jest przeliczane przez układ elektroniczny, bazujący na zapisanym w pamięci zestawie krzywych kalibracyjnych i zwracane przez urządzenie jako wartość procentowa zawartości danego pierwiastka [7].

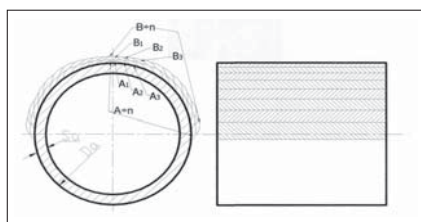
Analizatory XRF (X-Ray Fluorescence) określają skład chemiczny próbki poprzez pomiar charakterystycznego promieniowania X emitowanego przez różne pierwiastki zawarte w próbce pobudzone kwantami promieniowania o dużej energii (promienie X lub gamma) [8].

# Napawanie ręczne połączeń montażowych elementów ciśnieniowych stopem na osnowie niklu INCONEL 625

Firma SEFAKO S.A. w ramach kilku projektów wykonywała warsztatowy montaż elementów kotłowych napawanych stopem INCONEL 625. W zakresie prac należało wykonać standardowe złącza doczołowe z rur ze stali węglowo-manganowej dla uprzednio napawanych paneli ścian gazoszczelnych wraz z następującą po tym operacją napawania ręcznym stopem INCONEL 625.

Mając na uwadze wymagania jakościowe ( $Fe < 10\%$ ), aby spełnić oczekiwania klienta, opracowano technologię napawania ręcznego, metodą MIG dla połączeń montażowych elementów pokrytych warstwą stopu INCONEL 625.

Zgodnie ze sztuką, opracowano pWPS oraz wykonano próbę napawania w obecności inspektora jednostki notyfikowanej.



Rys. 7. Schemat napawania z zaznaczoną kolejnością wykonania napoin na rurze

Przed wykonaniem napoiny powierzchnia rury została dokładnie oczyszczona z wszelkich zanieczyszczeń tlenkowych. Żeby uzyskać właściwy skład chemiczny, zalecono, aby poszczególne ściegi tworzące napoinę zachodziły na siebie w 50%. Szerokość pojedynczego ściegu nie powinna przekraczać 10 mm.

Do osłony łuku spawalniczego zastosowano mieszanek gazową Ar-He (wg klasyfikacji EN 439 – I3: Cronigon He30s –  $CO_2 = 0,14\%$ ;  $H_2 = 2\%$ ; He = 23,3%; Ar = dopełnienie) zapewniającą korzystniejszą geometrię wtopienia, wynikającą z właściwości fizycznych He. Kolejność układania ściegów przedstawia rysunek 7.

Do wykonania napoiny zastosowano materiał dodatkowy MT-Nicro 625 (druć lity,  $\varnothing = 1,0$  mm) o składzie chemicznym podanym w tabelicy II.

Tablica II

| Skład chemiczny, % |      |    |    |     |    |         |      |     |
|--------------------|------|----|----|-----|----|---------|------|-----|
| Ni                 | C    | Cr | Fe | Mn  | Mo | Nb + Ta | S    | Si  |
| osnowa             | 0,02 | 22 | 1  | 0,2 | 9  | 3,3     | 0,01 | 0,2 |

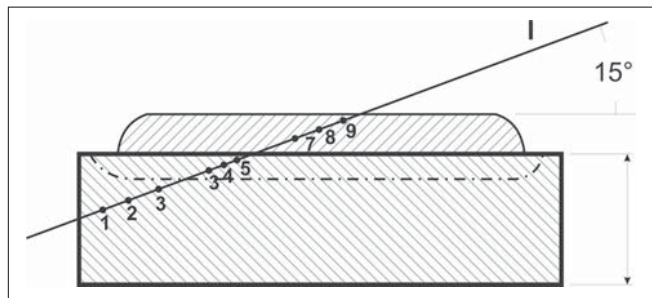
## Wyniki badań

Wykonane napoiny poddano następującym badaniom:

- Badanie wizualne – nie stwierdzono niezgodności, wynik pozytywny.
- Badanie penetracyjne – nie wykryto wskazań, wynik pozytywny.
- Badanie RT – stwierdzono obecność drobnych pęcherzy gazowych spełniających założone kryteria (AD HP 5/3), wynik pozytywny.
- Próba zginania próbek poprzecznych z rozciąganiem od strony napoiny, kąt zginania  $180^\circ$ , nie stwierdzono rys i pęknięć, wynik badania pozytywny.
- Badanie twardości.

### Badanie twardości

Pomiar twardości przeprowadzono na zglądzie zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 8. Wyniki pomiarów zestawiono w tabelicy III. Stwierdzona twardość jest niższa od dopuszczalnej 380HV (wg EN 288-3).



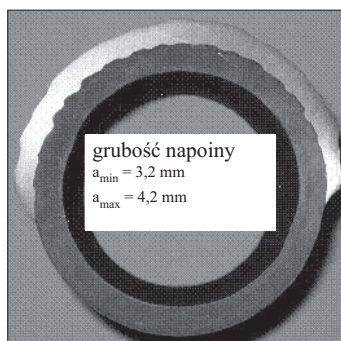
Rys. 8. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych twardości (wg VdTUV-Merkblatt 1156) [10]

Tablica III. Wyniki pomiaru twardości (HV5). Ocenie poddano MR oraz SWC, kryterium wg EN 288-3; wynik  $\leq 380$  HV

|   | MR – 15Mo3 | SWC | NAPAINA |
|---|------------|-----|---------|
| 1 | 183        |     |         |
| 2 | 190        | X   | X       |
| 3 | 175        |     |         |
| 4 |            | 191 |         |
| 5 | X          | 185 | X       |
| 6 |            | 181 |         |
| 7 |            |     | 254     |
| 8 | X          | X   | 254     |
| 9 |            |     | 254     |

### Badanie makroskopowe

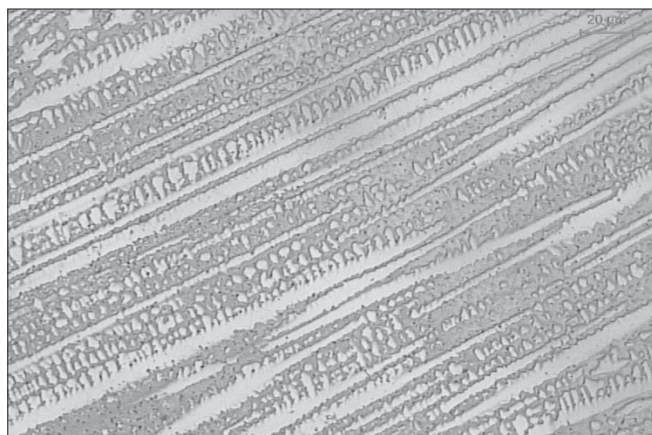
Wygląd makroskopowy napoiny pokazano na rysunku 9. Badania nie wykazały niedopuszczalnych niezgodności. Występowało jedynie nieregularne wtopienie napoiny w podłoże.



Rys. 9. Fotografia zglądu makro, trawione nitalem

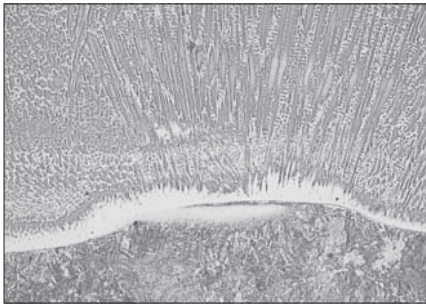
### Badanie mikroskopowe

Wyniki badań mikroskopowych przedstawionych na rysunkach 10, 11, 12 wykazały typowe struktury występujące w napoinie wykonanej spoiwem typu INCONEL. Napoina ma strukturę dendrytyczną z wydzieleniami faz międzymetalicznych. W obszarze linii wtopienia występuje struktura przegrzania charakterystyczna dla stali 15Mo3. W mikrostrukturze nie stwierdzono obecności mikropęknięć oraz niezgodności spawalniczych.

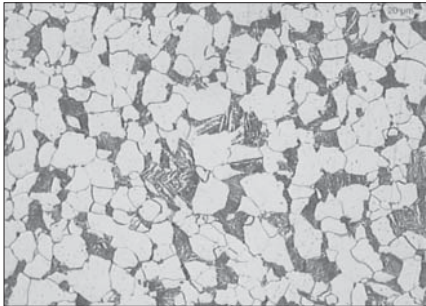


Rys. 10. Mikrostruktura napoiny. Widoczne dendryty oraz fazy międzymetaliczne w przestrzeniach międzydendrytycznych. Trawiono elektrolitycznie w 10%  $CrO_3$





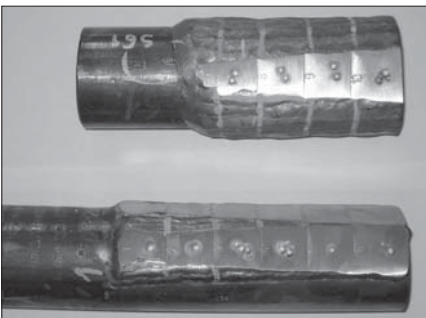
**Rys. 11.** Struktura obszaru linii wtopienia do materiału rodzimego. Widoczna dendrytyczna struktura napoiny oraz martenzytyczno-bainityczna struktura SWC. Trawiono elektrolitycznie w 10%CrO<sub>3</sub> oraz nitałem



**Rys. 12.** Ferrytyczno-perlityczna struktura materiału rodzimego. Trawiono nitałem

### Badanie zawartości żelaza w napoinie

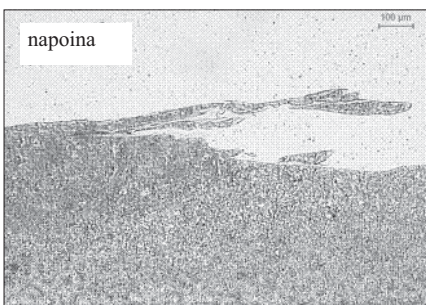
Zawartość żelaza badano na próbkach schodkowych. Próbkę schodkową wykonano metodą obróbki skrawaniem według schematu przedstawionego na rysunku 13. Następnie poddano ją badaniom składu chemicznego zarówno metodą iskrową, jak i RT. Urządzenia, których użyto do badań to: Spektrometr emisyjny SPECTROTEST TJF FC02F oraz analizator RT Niton XLt 898. W obydwu przypadkach otrzymano bardzo zbliżone wyniki. Średnie z tych badań przedstawiono w tablicy IV.



**Rys. 13.** Próbkę schodkowe do badania zawartości żelaza w napoinach

**Tablica IV.** Wyniki pomiaru grubości warstwy napoiny oraz zawartości żelaza

| Ozn. próbki          | PRÓBKA NR 1 |      |     |      |      | PRÓBKA NR 2 |      |      |      |      |
|----------------------|-------------|------|-----|------|------|-------------|------|------|------|------|
|                      | 1           | 2    | 3   | 4    | 5    | 6           | 7    | 8    | 9    | 10   |
| Grubość napoiny [mm] | 2,8         | 2,2  | 1,9 | 1,3  | 0,8  | 0,2         | 3,4  | 3,1  | 2,7  | 2,2  |
| Zawartość Fe [%]     | 4,93        | 5,66 | 4,3 | 8,33 | 9,84 | 2,55        | 6,13 | 3,28 | 4,37 | 4,97 |



**Rys. 14.** Niejednorodności w napoinie będące wynikiem intensywnej konwekcji nadtopionego materiału rodzimego. Trawiono nitałem

Mimo to, że wyniki odpowiadające poszczególnym grubościom napoin reprezentują zupełnie nielogiczny rozrzut udowodniono, że w żadnym przypadku nie przekroczono wymaganego progu 10% zawartości żelaza dla napoin wykonanych ręcznie. Te rozrzuty zawartości żelaza przy małych grubościach napoin są wynikiem dużej niejednorodności napoiny spowodowanej konwekcją cieczy bogatej w żelazo

z obszaru wtopienia w kierunku lica napoiny. Przykład niejednorodności wywołanych konwekcją pokazano na rysunku 14. Otrzymane wyniki pozwoliły na wyciągnięcie wniosku, że napoiny wykonane zgodnie z zaproponowaną technologią o grubości min. 3 mm spełnią założone kryteria dotyczące zawartości żelaza <10%.

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań przyjęta została technologia napawania zapewniająca otrzymanie napoin o żądanym składzie chemicznym. Żeby zmniejszyć prawdopodobieństwo otrzymania napoin nie spełniających podanych kryteriów zawartości żelaza, wykonywano napoiny o grubości 4 mm. Odbiorca wymagał jednak pomiaru i dokumentowania grubości warstw w cyklu produkcyjnym napoin w zakresie 100%. Pomiar wykonywano stosując urządzenie do pomiaru powłoki malarskiej, z sondą dwuzakresową umożliwiającą pomiar do 5 mm grubości warstwy pozbawionej właściwości ferromagnetycznych na warstwie o właściwościach ferromagnetycznych. Typ urządzenia ELCOMETER 456 + sonda F12 i sposób pomiaru pokazano na rysunku 15.



**Rys.15.** Sposób pomiaru grubości warstwy napoiny

Wdrożenie powyższej technologii napawania pozwoliło uniknąć wysokich kosztów związanych z zakupem, bądź wypożyczeniem drogiego sprzętu badawczego. Jednak w przypadku dużych powierzchni napawanie ręczne nie jest jednak możliwe z uwagi na dużą pracochłonność i niejednorodność składu chemicznego w pobliżu linii wtopienia. Do napawania dużych powierzchni ścian gazoszczelnych powinno stosować się zautomatyzowane napawanie. Przemawiają za tym zarówno względy ekonomiczne, gdyż możliwe jest uzyskanie warstwy napoiny o żądanym składzie chemicznym w jednym ściegu, a zatem występuje oszczędność drogiego materiału napoiny. Nie bez znaczenia są również względy technologiczne. Napawanie dużych powierzchni płyt ścian gazoszczelnych wymaga intensywnego odprowadzenia ciepła, a grubsza napoina oznacza więcej wprowadzonego ciepła oraz większy skurcz spawalniczy i związane z tym problemy otrzymania właściwych wymiarów dla elementu końcowego.

## LITERATURA

- [1] Poradnik inżyniera. Spawalnictwo. Tom 1. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003, rozdział 1, s. 34.
- [2] B-IGFool\* Energy Production Consultants, Identified Stakeholder Groups, Town Meeting June 21, 2005, Anywhere, USA.
- [3] Biomass Energy. Department of Planning and Natural Resources, Virgin Islands Energy Office, [www.vienenergy.org](http://www.vienenergy.org)
- [4] [www.eia.do.gov/kids/energyfacts/saving/recycling/solidwaste/wastetoenergy.html](http://www.eia.do.gov/kids/energyfacts/saving/recycling/solidwaste/wastetoenergy.html)
- [5] <http://www.cbll.net>
- [6] C.M. Schillmoller.: Chem. Eng., Vol. 87 (No. 5), 10 March 1980, p. 161.
- [7] [www.spectro.com](http://www.spectro.com)
- [8] [www.niton.com](http://www.niton.com)
- [9] Klimpel.: Technologia spawania i cięcia metali. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 1997, s. 193, rys. 5.6.
- [10] M. Błaszczyk.: Uznanie technologii napawania – dokument wewn. Fabryki Kottów SEFAKO S.A., rok 2005. Dok. nr V232D (4834P5164/5/V011).
- [11] <http://www.smt.sandvik.com/composite>