

METODA JEDNOSTRONNEGO DOPROWADZANIA ENERGII WIELKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI
DO NAGRZEWANIA SPOIN KLEJOWYCH W KONSTRUKCJACH Z DREWNA

Kazimierz Moldenhawer

Katedra Tworzyw Drzewnych AR w Poznaniu

Do klejenia konstrukcji z drewna dotychczas powszechnie są stosowane kleje wiążące w temperaturze około 20°C. Związane to jest z trudnościami w doprowadzeniu energii cieplnej na drodze przewodnictwa do spoin klejowych, których wymiary i kształt wymagają przegrzania znacznych grubości drewna. Często spoiny dostępne są tylko z jednej strony klejonego elementu, co ma miejsce szczególnie w konstrukcjach stolarki budowlanej oraz w meblarstwie.

Zastosowanie klejów termoutwardzalnych prowadzi do znacznego skrócenia czasu ich wiązania, jednak łączy się to z zagadnieniem doprowadzenia energii do spoin oddalonych o kilkanaście do kilkudziesięciu milimetrów od źródła energii. W przypadku konwencjonalnego nagrzewania czas potrzebny do osiągnięcia wymaganej temperatury w najgłębszych warstwach spoiny wynosić może kilkanaście minut, niwelując efekt szybkiego wiązania kleju termoutwardzalnego [6]. Stąd od dłuższego czasu podejmowane są próby nad różnymi sposobami doprowadzenia do spoiny klejowej odpowiedniej ilości energii w celu przyspieszenia całego procesu klejenia. Spośród wielu czynionych doświadczeń należy wymienić metody doprowadzenia energii do spoiny poprzez:

- promieniowanie podczerwone,
- ultradźwięki,
- promieniowanie rentgenowskie,
- promieniowanie gamma.

Promieniowanie podczerwone o długości fali 0,8 ÷ 3 μm, ma bardzo ograniczone zdolności wnikania w drewno oraz spoinę klejową. W związku z tym ten rodzaj energii nie nadaje się do przyspieszonego utwardzania spoin klejowych w konstrukcjach z drewna.

Energia drgań ultradźwiękowych może docierać na znaczne głębokości spoin kle-

jowych pod warunkiem, iż nadajnik będzie ściśle powiązany ze spoiną klejową. Najmniejsza nieciągłość w ciekłym ośrodku, tj. w kleju prowadzi do gwałtownego spadku doprowadzanej energii ultradźwiękowej, co jest prawie regułą w bardzo cienkich warstwach spoiny występującej pomiędzy dwiema powierzchniami drewna.

Za pomocą promieniowania rentgenowskiego, a w szczególności za pomocą promieniowania gamma można dostarczyć znaczne ilości energii do spoiny klejowej, jednak wiąże się to z ujemnymi skutkami w postaci destrukcji tkanki drzewnej. Nie do pominięcia jest również fakt stosunkowo dużego promieniowania ubocznego zagrażającego obsłudze urządzeń. W ostatnim okresie w krajach wysoko rozwiniętych obserwuje się wycofywanie ze stosowania tego typu energii nawet w tak efektywnych procesach, jak utwardzanie powłok lakierowych utworzonych na drewnie i tworzywach drzewnych.

W tym stanie jedynie energia pola wielkiej częstotliwości w zakresie $1 \cdot 10^6 \div 1 \cdot 10^8$ MHz znalazła zastosowanie dla nagrzewania spoin klejowych utworzonych na bazie żywic aminowych. Jednak w porównaniu z proponowaną metodą dostarczania energii z jednej strony spoiny, dotychczas stosowane nagrzewanie za pomocą pola wielkiej częstotliwości wymaga umieszczenia dwóch elektrod po przeciwnych stronach spoiny klejowej [2, 3]. Na korzyść tej metody zaliczyć należy najniższą energochłonność przy nagrzewaniu drewna odznaczającego się bardzo małym współczynnikiem przewodności cieplnej [5].

Na przeszkodzie w rozpowszechnieniu tej metody stały natomiast dość wysokie koszty generatorów na układach lampowych. Powodowało to ograniczenie prac badawczych nad nowymi metodami nagrzewania spoin klejowych w polu wielkiej częstotliwości. Obecnie, gdy coraz powszechniejsze stają się układy półprzewodnikowe, których sprawność energetyczna dochodzi do 75% w porównaniu z 50% dla układów lampowych, znów staje się aktualne prowadzenie prac nad intensywnym nagrzewaniem spoin klejowych w polu wielkiej częstotliwości [2].

Nowoczesna technika umożliwia podwyższanie częstotliwości, a co za tym idzie zwiększanie efektywności nagrzewania bez potrzeby podwyższania napięcia na elektrodach, ponieważ moc wydzielana (W/cm^3) określona jest zależnością:

$$P = k \cdot U^2 \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot f, \quad (1)$$

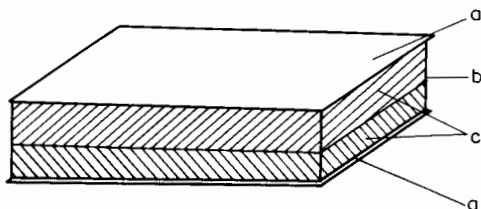
gdzie:

- K - współczynnik przeliczeniowy,
- U - napięcie,
- ε - stała dielektryczna,
- $\operatorname{tg} \delta$ - kąt stratności,
- f - częstotliwość drgań.

Stosowanie niższego napięcia na elektrodach ma zasadnicze znaczenie ze względu na możliwość uniknięcia iskrzenia oraz powstawania efektu zwęglania.

Z podwyższeniem częstotliwości związane jest niekorzystne zjawisko skracania fali stojącej, a więc występowania nierównomiernego nagrzewania wzdłuż spoiny klejowej. Zastosowanie dodatkowych cewek rozmieszczonych wzdłuż elektrod prowadzi jednak do wyrównania natężenia pola w spoinie.

Rozpatrując zagadnienie doprowadzenia energii wielkiej częstotliwości do spoin klejowych można wyodrębnić dwa przypadki. Usytuowanie elektrod równoległe do powierzchni spoin klejowych, co przedstawiono schematycznie na rysunku 1. W powyż-



Rys. 1. Schemat równoległego usytuowania spoin w stosunku do płaszczyzn elektrod; a - elektrody, b - spoina, c - drewno

szym układzie warstw drewno - klej, stosunek mocy wydzielanych w kleju P_1 do mocy wydzielanej w drewnie P_2 wynosi:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\varepsilon_2 d_1}{\varepsilon_1 d_2} \right)^2 \frac{d^2 \varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1}{d_1^2 \varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2}, \quad (2)$$

co po uproszczeniu daje postać:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_2}. \quad (3)$$

Przyjmując dla klasycznego kleju mocznikowego stałą dielektryczną $\varepsilon_1 = 25$ i kąt stratności $\operatorname{tg} \delta_1 = 0,6$, a dla drewna sosnowego o wilgotności $W = 6 \div 8\%$ $\varepsilon_2 = 5$, $\operatorname{tg} \delta_2 = 0,05$ otrzymamy stosunek:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{3}{1,25} \approx 2,4. \quad (4)$$

Uwzględniając o wiele większą grubość warstw drewna w stosunku do warstw kleju, w rozpatrywanym przypadku zachodzi niekorzystne wydzielanie się dużej ilości energii w drewnie prowadzące do nagrzania wsadu w całej objętości. Wynika stąd, iż powyższa metoda może być stosowana tylko do klejenia stosunkowo cienkich warstw drewna, gdyż i tak musi nastąpić nagrzanie całej jego objętości.

Znacznie korzystniejsza z punktu widzenia sprawności energetycznej jest metoda dostarczania energii w układzie warstw prostopadłych w stosunku do elektrod, co przedstawiono na rysunku 2. W tym przypadku moc wydzielana w warstwie kleju wynosi:

$$P_1 = 5,56 \cdot 10^{13} \left(\frac{U}{d}\right)^2 \varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1 \cdot f, \quad (5)$$

natomiast w drewnie

$$P_2 = 5,56 \cdot 10^{13} \left(\frac{U}{d}\right)^2 \varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2 \cdot f, \quad (6)$$

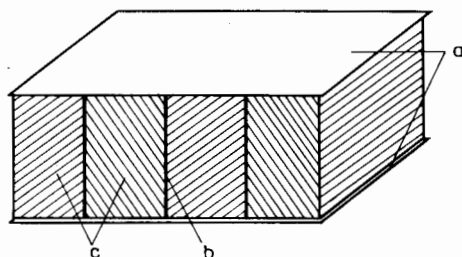
zatem stosunek mocy

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\varepsilon_1 \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_2 \operatorname{tg} \delta_2}, \quad (7)$$

co przy omawianym przykładzie właściwości kleju i drewna daje:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{15}{0,25} = 60. \quad (8)$$

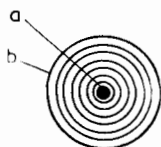
Ten sposób nagrzewania zapewnia selektywne doprowadzenie energii pola wielkiej częstotliwości do spoin klejowych nie powodując niepotrzebnego nagrzewania całej masy drewna.



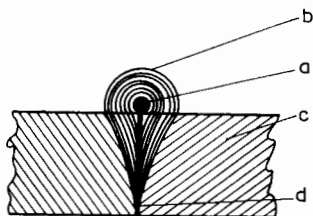
Rys. 2. Schemat prostokątnego usytuowania spoin w stosunku do płaszczyzn elektrod; a - elektrody, b - spoina, c - drewno

Nowym proponowanym przez autora sposobem doprowadzenia energii wielkiej częstotliwości do spoin klejowych szczególnie w przemyśle meblarskim jest stosowanie rozproszonego pola powstającego wokół metalowej elektrody przylegającej do spoiny klejowej. W jednorodnym dielektryku linie pola powstające wokół elektrody prętowej układają się koncentrycznie, tak jak to przedstawiono schematycznie na rysunku 3.

Innego typu rozkład pola występuje wokół elektrody metalowej dotykającej spoiny klejowej otoczonej warstwami drewna o znacznie niższej wartości stałej dielek-



Rys. 3. Rozkład pola elektrycznego w jednorodnym ośrodku; a - elektroda, b - linie pola elektrycznego



Rys. 4. Rozkład pola elektrycznego w klejonym drewnie; a - elektroda, b - linie pola elektrycznego, c - klejone drewno, d - spoina

trycznej. W tym przypadku następuje ugięcie oraz skupienie pola wzdłuż spoiny, co przedstawiono na rysunku 4.

Oczywiście zasięg oddziaływania pola wielkiej częstotliwości jest w tym przypadku mniejszy, niż to ma miejsce przy polu wytwarzanym między dwiema elektrodami. Należy jednak uwzględnić, iż w połączeniach meblowych nie występują na ogół duże odległości między dostępną dla elektrody częścią spoiny i jej przeciwną krawędzią. W związku z tym postanowiono przeprowadzić badania nad nagrzewaniem w polu wielkiej częstotliwości spoin o wysokości 30 mm.

Zakładając, iż częstotliwość drgań pola ma istotne znaczenie na efekt nagrzewania spoin klejowych przy wykorzystaniu rozproszonego pola, do badań użyto generatora przestrajanego o częstotliwościach $f_1 = 6,5$ MHz, $f_2 = 13$ MHz i $f_3 = 27$ MHz. Napięcie na elektrodach zmieniano $U_1 = 3$ kV dla f_1 , $U_2 = 2$ kV przy f_2 , $U_3 = 1,4$ kV dla f_3 , dążąc w ten sposób do zapewnienia jednakowej mocy dostarczanej (P) do spoiny klejowej zgodnie z zależnością:

$$P = k \cdot U^2 \cdot f. \quad (9)$$

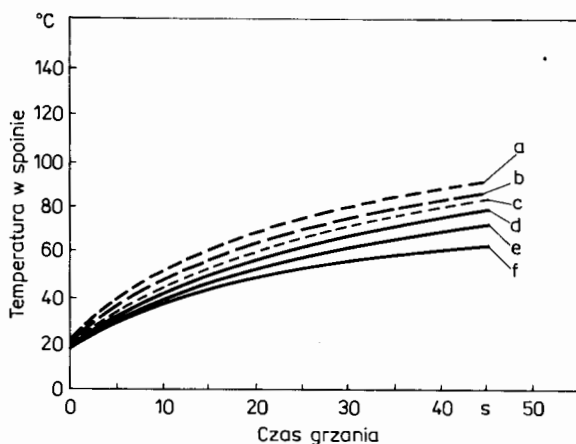
W celu określania efektów nagrzewania spoiny postanowiono mierzyć jej temperaturę w trzech miejscach oddalonych o 8, 16 i 24 mm od elektrody przy wysokości spoiny wynoszącej 30 mm. Zastosowano w tym celu własną metodę pomiaru temperatury przy użyciu specjalnych termooigni podłączanych tylko na bardzo krótki okres do miernika oddzielonego filtrami [4]. W badaniach pominięto określanie zmian natężenia pola w funkcji odległości od elektrody, ponieważ wszelkie dostępne sondy wprowadziły bardzo duże zakłócenia w rozkładzie pola w spoinie.

W badaniach stosowano:

- żywicę mocznikową U 70 o koncentracji 69%,
- utwardzacz NH_4Cl w stosunku 1:150 suchej masy chlorku amonu do suchej masy żywicy,
- dodatkowy jonizator w postaci wodnego roztworu NaCl w stosunku 1:100 w odniesieniu do suchej masy,
- czas dostarczania energii wielkiej częstotliwości do spoiny $\tau = 45$ s.

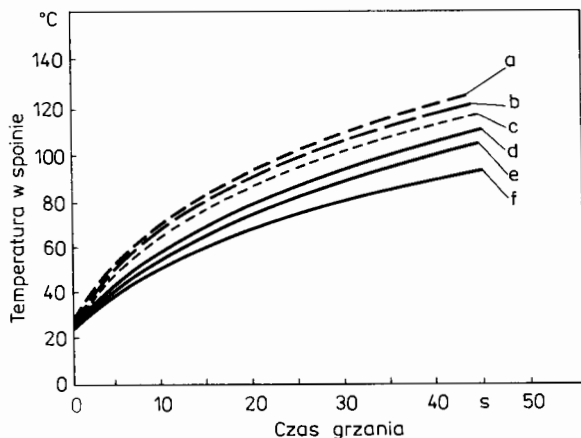
W celach porównawczych przeprowadzono dodatkowe doświadczenia z selektywnym nagrzewaniem takich samych spoin znajdujących się między dwiema elektrodami. Kierując się wartością natężenia prądu anodowego obniżono w tym przypadku o 25% napięcie na elektrodach.

Rysunki 5-7 obrazują zmiany temperatury w spoinie w czasie nagrzewania ich energią pola o częstotliwościach: $f_1 = 6,5$ MHz, $f_2 = 13$ MHz, $f_3 = 27$ MHz. Jak wynika z przedstawionych danych, intensywność nagrzewania, szczególnie w strefach najbardziej oddalonych od elektrody, przy polu rozproszonym zwiększa się w miarę wzrostu częstotliwości.

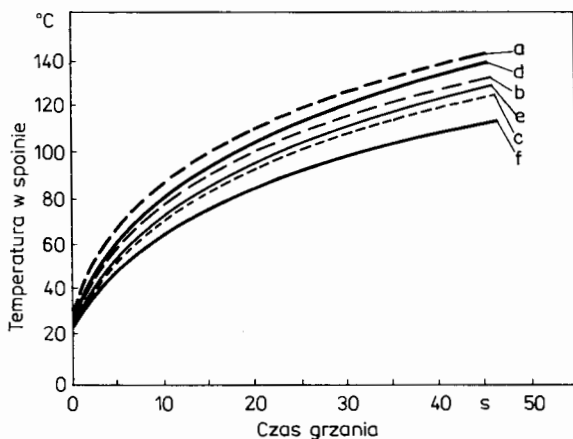


Rys. 5. Wpływ czasu nagrzewania na wzrost temperatury w spoinie klejowej; częstotliwość generatora 6,5 MHz; a - głębokość 8 mm selektywne nagrzewanie, b - głębokość 16 mm selektywne nagrzewanie, c - głębokość 24 mm selektywne nagrzewanie, d - głębokość 8 mm pole rozproszone, e - głębokość 16 mm pole rozproszone, f - głębokość 24 mm pole rozproszone

W celu lepszego zobrazowania wpływu temperatury spoiny klejowej na szybkość wiązania kleju mocznikowego, na rysunku 8 przedstawiono zależność intensywności nagrzewania w funkcji czasu oddziaływania pola. Wykładniczy charakter funkcji prowadzi do zwiększania różnic między poszczególnymi wariantami przedstawionymi na rysunkach 5-7. Szczególnie wyraźnie występuje to zjawisko przy temperaturach poniżej 100°C dla częstotliwości $f_1 = 6$ MHz. W tym przypadku należałoby po-



Rys. 6. Wpływ czasu nagrzewania na wzrost temperatury w spoinie klejowej; częstotliwość generatora 13 MHz; oznaczenia jak do rys. 5



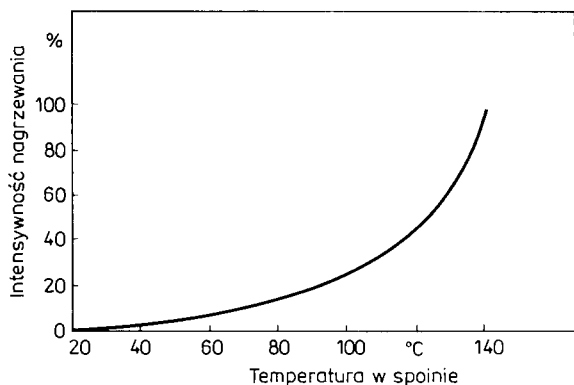
Rys. 7. Wpływ czasu nagrzewania na wzrost temperatury w spoinie klejowej; częstotliwość generatora 27 MHz; oznaczenia jak do rys. 5

większyć czas nagrzewania powyżej 45 s, by uzyskać wymagany efekt w postaci wzrostu temperatury spoiny klejowej powyżej 100°C , co prowadzi do osiągnięcia wymaganej wartości wytrzymałości.

Rozpatrując zagadnienie z punktu widzenia przydatności proponowanej metody jednostronnego doprowadzenia energii wielkiej częstotliwości do spoiny można stwierdzić, że uzyskiwane efekty są na tyle pomyślne, by prowadzić dalsze badania w tym kierunku, a zwłaszcza nad powiększeniem głębokości wnikania pola w spoinę klejową, podwyższeniem częstotliwości stosowanych generatorów i zmianą właściwości kleju poprzez odpowiednio ukierunkowany dobór utwardzacza i jonizatora.

Na podstawie omówionych badań można wysunąć następujące wnioski:

- 1) istnieje możliwość zastosowania rozproszonego pola wielkiej częstotliwości do nagrzewania spoin klejowych przy użyciu tylko jednej elektrody,
- 2) głębokość oddziaływania energii pola wielkiej częstotliwości w spoinę klejową zwiększa się wraz z częstotliwością w badanym zakresie od 6,5 MHz do 27 MHz,



Rys. 8. Wpływ temperatury na intensywność nagrzewania spoiny klejowej

- 3) zwiększenie intensywności nagrzewania związane jest ze wzrostem częstotliwości oraz z dodaniem środków jonizujących wodny roztwór kleju mocznikowego,
- 4) konieczne jest dalsze prowadzenie badań w wytyczonym kierunku w celu opracowania nowej technologii nagrzewania spoin klejowych za pomocą tylko jednej elektrody.

LITERATURA

1. Antonowicz J.: Własności dielektryków. WNT, Warszawa 1971.
2. Gefahrt J.: Zur Physik und Technik der Spanevorwärmung mit Hochfrequenzenergie. Holz als Roh- und Werkstoff 1975, 33, 5, 176-180.
3. Moldenhawer K., Lasik J.: Badania mierzące do ustalenia optymalnych warunków klejenia doklejek do płyt wiórowych przy zastosowaniu energii wielkiej częstotliwości. Materiały V Sesji Młodych Pracowników Nauki i Techniki Drzewnictwa. AR w Poznaniu, 1980, 54-64.
4. Moldenhawer K.: Niektóre zagadnienia związane z pomiarem temperatury wewnątrz drewna i tworzyw drzewnych. Materiały V Sesji Młodych Pracowników Nauki i Techniki Drzewnictwa. AR w Poznaniu 1981, 131-136.
5. Wilson T. L.: Calculating the effect of high frequency on the curing of boards. Proc. 11th WSU Intern. Symp., Pullman 1977, 141-156.
6. Zenkteler M.: Kleje i Klejenie Drewna. WNT, Warszawa 1984.

Казимеж Мольденгавер

МЕТОД ОДНОСТОРОННЕГО ПОДВОДА ЭНЕРГИИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ
ДЛЯ НАГРЕВА КЛЕЕННЫХ ШОВОВ В ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Р е з ю м е

Проведенные испытания нового метода подвода энергии высокой частоты к клееным шовам с использованием только одной электроды, показали его пригодность особенно в случае выступления значительных трудностей с использованием другой электроды. Установлено, что повышение частоты генератора с 6,5 Мгц до 27 Мгц приводит к получению высшей интенсивности нагрева при одновременном расширении пределов действия поля высокой частоты.

Kazimierz Moldenhawer

THE METHOD OF ONE-SIDED HIGH-FREQUENCY ENERGY
INPUT FOR WARMING UP GLUE JOINTS IN THE WOODEN CONSTRUCTIONS

S u m m a r y

Tests with the new method of the high-frequency energy input to glue joints using only one electrode proved usefulness of this method, particularly at considerable difficulties connected with application of the second electrode. It has been found that an increase of the generator frequency from 6.5 up to 27 MHz would lead to higher warming up intensity at simultaneous widening of the range of the high-frequency field effect.