

TADEUSZ HOP, ZENON MIODYŃSKI

NOWE MOŻLIWOŚCI IĄCZENIA MATERIAŁÓW

Streszczenie. Ciągły deficyt stali, odczuwany m.in. przez budownictwo, skłania do poszukiwań takich rozwiązań konstrukcyjnych, w których dałoby się zastąpić ten cenny metal materiałami tańszymi i łatwiej dostępnymi. Wydaje się, że jednym z takich materiałów może być szkło. Problem ten jest wart głębszej analizy i odpowiednich badań, czego podjęła się Katedra Budowli Komunalnych Politechniki Śląskiej. W związku z tym wyłoniło się zagadnienie połączeń szkła ze szkłem, szkła ze stalą, szkła z betonem itp.

W artykule skupiono uwagę na połączeniach klejonych szkła. Po scharakteryzowaniu istoty tych połączeń omówiono kleje syntetyczne i podano zasady technologii klejenia.

1. Wstęp

W związku z rozwojem prefabrykacji i uprzemysłowienia budownictwa coraz większego znaczenia nabiera zagadnienie łączenia i zespalania różnych materiałów. Wiadomo, że ściany, stropy i dachy budynków spełniają różnorodne funkcje: przenoszą obciążenia, stanowią przegrody izolujące, nadają wyraz architektoniczny bryle budynku i wnętrzą. Tym funkcjom musi odpowiadać struktura części składowych budynku. Ponieważ trudno jest znaleźć materiał, który by przy odpowiedniej wytrzymałości był złym przewodnikiem ciepła i dźwięków, nie pochłaniał i nie przepuszczał wilgoci, a jednocześnie spełniał wymagania architektoniczno-plastyczne, więc w nowoczesnych rozwiązaniach konstrukcji budynków łączy się w poszczególnych elementach różne materiały i każdemu z nich przeznacza się do spełnienia zadanie zgodne z jego własnościami. Jeden materiał przenosi obciążenia, drugi jest izolatorem itd.

Celowy jest i stosowany podział zadań pomiędzy poszczególne materiały w zależności od charakteru sił wewnętrznych. Klasycznym tego przykładem jest żelbet. W belce żelbetowej np. ściskania przenosi beton a rozciągania stal. Możliwe jest również konstruowanie takich belek, w których naprężenia

ściskające będą przekazywane na szkło, a naprężenia rozciągające przejmie stal, aluminium lub tworzywo sztuczne.

Podstawowym i trudnym zagadnieniem w tego typu konstrukcjach będzie przeniesienie naprężeń ścinających występujących wzdłuż styków poszczególnych komponentów. W sukurs przychodzą nam tu właśnie kleje syntetyczne. W pewnym, niezbyt jeszcze szerokim zakresie zostały one już zastosowane do łączenia metali, głównie stali ze stalą [16], [12] oraz do łączenia w różnych wariantach takich materiałów jak: stal beton, azbestocement, tworzywa sztuczne, aluminium [14], [1] [7], [19]. Spotyka się również w literaturze wzmianki o możliwościach łączenia przez klejenie szkła ze szkłem i szkła z innymi materiałami [16], [17]. Możliwości te nie zostały jednak dotychczas wykorzystane nawet w doświadczalnych rozwiązaniach konstrukcyjnych.

W odróżnieniu od dotychczas rozpowszechnionych sposobów łączenia, klejenie ma tę cenną zaletę, że nie powoduje osłabienia zespalanych elementów, (co ma miejsce przy stosowaniu śrub i nitów) i nie wywołuje niekorzystnych naprężeń dodatkowych (powstających np. przy spawaniu).

Nowoczesne kleje syntetyczne stwarzają możliwość konstruowania połączeń przenoszących bardzo duże naprężenia ścinające (nawet rzędu kilkuset kg/cm^2). Połączenia takie mogą pracować zarówno pod obciążeniem statycznym, jak i dynamicznym.

Interesować nas będzie klejenie "na zimno", tzn. w temperaturze poniżej 40°C .

2. Istota klejenia

Technika klejenia, aczkolwiek znana od tysiącleci, ograniczała się do spajania takich tworzyw jak drewno, czy papier. Główną przyczyną tego stanu rzeczy była stosunkowo niska wytrzymałość i odporność ówczesnie znanych klejów. Dopiero rozwój tworzyw sztucznych dokonał w tej dziedzinie przewrotu i to takiego, że obecnie nie ma praktycznie tworzywa, którego nie dałoby się skleić.

Trzeba również podkreślić, że wprowadzenie klejów np. do łączenia metali trwało stosunkowo długo i połączone było z pewnymi oporami u konstruktorów. Obawy okazały się nieuzasadnione i kleje syntetyczne wprowadzone chociażby do lotnictwa dały zdumiewające wyniki.

Dobry klej winien spełnić cztery podstawowe warunki [9]:

- 1) przy zastosowaniu prostych operacji przechodzić ze stanu ciekłego w stan stały,
- 2) w stanie ciekłym doskonale zwilżać powierzchnię klejonego tworzywa,

- 3) w stanie utwardzonym charakteryzować się dobrą przyczepnością, czyli adhezją do powierzchni klejonej,
- 4) w stanie utwardzonym wykazywać odpowiednią wytrzymałość mechaniczną, czyli tzw. kohezję.

Mechanizm przejścia kleju ze stanu ciekłego w stan stały nazywamy utwardzaniem kleju i może on mieć charakter fizyczny lub chemiczny. Kleje będące roztworami żywic stałych w wodzie lub w rozpuszczalnikach organicznych będą w trakcie utwardzania się przechodziły w stan stały na skutek wyparowania lub dyfuzji rozpuszczalnika z roztworu przez tworzywo klejone, które winno być bądź porowate, bądź musi posiadać zdolność absorbowania tego rozpuszczalnika. W tym wypadku utwardzanie kleju ma charakter fizyczny. Analogicznym przypadkiem jest utwardzanie się klejów na żywicach termoplastycznych. Utwardzanie chemiczne ma miejsce przy stosowaniu klejów chemoutwardzalnych. Istotą procesu twardnienia są reakcje chemiczne zachodzące w spoinie klejowej. Głównie są to reakcje polikondensacji i polimeryzacji. Utwardzanie chemiczne klejów może się odbywać w temperaturze podwyższonej lub pokojowej pod wpływem katalizatorów, czyli tzw. utwardzaczy.

Zwilżanie przedmiotu klejonego przez roztwór kleju świadczy o tym, że między cząsteczkami tworzywa klejonego a cząsteczkami kleju działają siły przyciągające zwane siłami adhezji lub inaczej siłami przyczepności. Te siły są natury elektrostatycznej, a przyczyną ich powstawania jest nierównomierny rozkład ładunków elektrycznych, tak w cząsteczkach tworzywa klejonego jak i kleju. Adhezja wywołana działaniem sił elektrostatycznych nazywa się adhezją specyficzną lub przyczepnością właściwą. Należy ją odróżnić od adhezji mechanicznej, która jest wynikiem osadzania się cząsteczek utwardzanego kleju w porach lub nierównościach powierzchni klejonego tworzywa. Działanie spajające zawdzięcza klej przede wszystkim adhezji specyficzej.

Bardzo istotną cechą, którą winien charakteryzować się dobry klej, jest wytrzymałość utwardzanej masy kleju czyli kohezja (spójność). Siły kohezji podobnie jak i adhezji są natury elektrostatycznej, działają jedynie między cząsteczkami samego kleju i mają wpływ na to, że przy określonych siłach zewnętrznych spoina nie pęka, tzn. posiada dobrą wytrzymałość mechaniczną.

Widzimy więc, że wytrzymałość połączenia klejonego zależy od wzajemnego stosunku i wielkości trzech sił:

- a) siły adhezji kleju do tworzywa,
- b) siły kohezji kleju,
- c) siły kohezji tworzywa klejonego.

Przypadek idealny, świadczący o właściwym doborze kleju do łączenia danego tworzywa zachodzi wtedy, gdy siły adhezji i

kohezji kleju przewyższają siłę kohezji klejonego tworzywa. W praktyce najczęściej staramy się tak dobrać parametry, aby wytrzymałość połączenia odpowiadała wytrzymałości klejonego tworzywa.

3. Charakterystyka szkła

Ogólne wyniki prac Browne'a i Truax prowadzą do wniosku, że w procesach klejenia najistotniejszą rolę odgrywa nie przyczepność mechaniczna, lecz adhezja specyficzna związana, jak to wyżej podano, z polarną budową cząsteczek. Jednym z zjawisk adhezji specyficznej jest zdolność zwilżania powierzchni tworzywa klejonego przez cząsteczki kleju w stanie ciekłym. Proces adhezji można ułatwić poprzez aktywację cząsteczek powierzchniowych drugiego z łączonych tworzyw np. drogą ogrzewania.

Konieczność łączenia cząsteczek substancji klejącej z cząsteczkami tworzywa klejonego stawia przed chemikami problem przygotowania klejów, których budowa cząsteczkowa najlepiej odpowiada warunkom adhezji. Ponieważ w zjawisku adhezji grają rolę siły zależne od natury cząsteczek kleju i tworzywa klejonego, nie można sobie wyobrazić istnienia tzw. kleju uniwersalnego, który sklejałby równie dobrze wszystkie tworzywa. Logicznym następstwem tego faktu są także specyficzne kleje do łączenia szkła.

Najważniejsze prace z zakresu adhezji do szkła zostały wykonane przez Mosera [13], [17]. Stwierdzono, że powierzchniowa warstewka szkła poddana działaniu czynników atmosferycznych zawiera głównie czynne grupy wodorotlenowe. Okazało się również, że powierzchnia szkła ulega w sposób łatwy modyfikacji pod wpływem różnorodnych związków chemicznych. Tak np. działaniem dwuchlorodwumetylosilanu zmodyfikowana powierzchnia szkła wykazuje właściwości hydrofobowe, co jest dowodem obecności na niej grup niepolarnych (w układzie szkło-powietrze-woda kąt zwilżania wynosi ok. 95°). Równocześnie wykonano pomiary kątów zwilżania różnych rodzajów szkła niemodyfikowanego i otrzymano wartości kąta zwilżania niższe od 20° , co świadczy o ich dobrej zwilżalności. Stwierdzono, że szkło jest doskonale zwilżane przez węglowodory alifatyczne i aromatyczne oraz ich chlorowcopochodne, ponadto przez estry, alkohole, aminy, kwasy organiczne a także przez niektóre monomery oraz plastyfikatory. Bardzo interesujące wyniki, jakie uzyskał Moser [13], [17], dotyczą własności adhezyjnych modyfikowanej powierzchni szkła uzyskanej przez oczyszczenie bądź przez wytworzenie warstewki pierwotnej.

Jeżeli powierzchnię szkła powlecemy mieszaniną koloidalnego krzemianu z pochodną fenolu, wtedy zostanie utworzona warstewka pierwotna i taka modyfikacja powierzchni szkła, orientująca właściwe grupy funkcyjne, zwiększa przyczepność

kleju do powierzchni i tym samym podwyższa wytrzymałość połączenia klejonego. W tym przypadku bowiem koloidalny krzemian jest wiązany przez sieć tlenowo-krzemową szkła, a rdzeń fenolowy orientowany ku zewnętrznej stronie nałożonej warstewki powoduje zwiększenie jej aktywności w stosunku do czystej powierzchni szkła. Wpływ warstewki pierwotnej na wytrzymałość np. spoiny rozciąganej przedstawia się następująco:

- a) klej oparty na żywicy fenolowoformaldehydowej modyfikowanej daje wytrzymałość spoiny na rozierwanie:
 - bez warstewki pierwotnej: 111 kg/cm^2 ,
 - z warstewką pierwotną: 225 kg/cm^2 ,
- b) klej oparty na żywicy fenolowoformaldehydowej nie modyfikowanej daje w tym samym przypadku wartości:
 - bez warstewki pierwotnej: 0 kg/cm^2 ,
 - z warstewką pierwotną: 46 kg/cm^2 .

Badania adhezji rozmaitych związków chemicznych dały różne wyniki mniej lub bardziej zadowalające. Stwierdzono więc, że podstawione fenole jak np. o - hydroksobenzaldehyd wykazują znacznie większą przyczepność niż sam fenol. Jeszcze silniejszą przyczepność niż grupy hydroksylowe wykazują grupy silnie polarne jak acetalowe w poliformalu lub poliwinyllobutyralu.

Żywice epoksydowe dają bardzo wytrzymałe połączenia szkła ze szkłem i szkła z metalem, przy czym w przypadku konieczności łączenia elementów szklanych i metalowych o różnych współczynnikach rozszerzalności sklejanie dokonuje się w dwóch etapach:

I etap - powleka się cienką warstwą żywicy epoksydowej obie powierzchnie i utwardza,

II etap - między utwardzone powierzchnie wprowadza się ponownie nową warstewkę żywicy epoksydowej i utwardza ją w temperaturze możliwie niskiej.

Otrzymuje się w ten sposób spoiny stosunkowo elastyczne. Wadą tej metody jest stosunkowo duża grubość spoiny.

Stwierdzono również, że dobrą przyczepność do szkła wykazują kleje silikonowe [5], jednak ustępują przyczepności lakierów alkidalowych. Stąd kleje silikonowe modyfikowane alkidami wykazują znacznie lepszą adhezję. Ponadto są one odporne na warunki atmosferyczne i wykazują stosunkowo dużą elastyczność w niskich temperaturach.

Niektóre rodzaje szkła o charakterze silnie alkalicznym i hydrofilowym zatrzymują na krawędziach sklejanych elementów warstewkę wody, która może z czasem przeniknąć między warstewkę kleju a podłoże, powodując po dłuższym okresie czasu odłączanie się jej od powierzchni szkła.

Trzeba stwierdzić, że próblem przyczepności do szkła jest trudnym do szczegółowego zbadania, gdyż istnieje wiele handlowych rodzajów szkła o bardzo zróżnicowanych charakterystykach fizycznych i chemicznych, które w sposób bardzo istotny wpływają na własności wiążące tego samego kleju [6], [4], [18], [8].

Dlatego też wielu autorów wskazuje na konieczność doboru odpowiednich gatunków szkła nadających się do połączeń szkło-szkło i szkło-metal.

Własności niektórych gatunków szkła podano w tablicy 1.

Tablica 1

Własności fizyczne niektórych typów szkła

Własności fizyczne	Szkło zwykłe wapniowo-sodowe 16% Na ₂ O 10% CaO	Szkło borowo- krzemia- nowe	Szkło kwarco- we
Wytrzymałość na ściskanie kg/cm ²	4000-12000	10000	20000
Wytrzymałość na rozciąganie kg/cm ²	300-1000	700-900	900
Wytrzymałość na zginanie kg/cm ²	120-130	-	-
Udarność kGcm/cm ²	0,1-0,3	-	-
Ciężar właściwy G/cm ³	2,2-2,6	2,4	2,2
Porowatość względna w %	0	0	0
Nasiąkliwość w %	0	-	-
Współczynnik sprężystości kg/mm ²	5000-8000	-	-
Temp. mięknięcia w °C	500-700	-	1350
Przewodnictwo cieplne kcal/m godz. °C	0,72	0,72	1,26
Współczynnik rozszerzalności liniowej $\alpha \cdot 10^6$	8-10	3-5	0,53

4. Kleje syntetyczne

Przedstawiamy tu szkiecowo kleje mogące znaleźć zastosowanie do łączenia szkła "na zimno". Niektóre z nich zostały już zastosowane w pracach badawczych Katedry Budowli Komunalnych.

4.1. Klej oparty o żywicę fenolowo-formaldehydową modyfikowaną poliwinylbutyralem (analog radzieckich klejów BF-4 BWF-21, BWF-41)

Jest substancją ciekłą o barwie żółtej do czerwonej. Lepkość reguluje się dodatkiem etanolu. Klej nadaje się do połączeń szkło-szkło, szkło-metal o dużej wytrzymałości w niskich i wysokich temperaturach. W trakcie badań wytrzymałości spoin na zginanie w temp. -60°C do $+180^{\circ}\text{C}$ nie stwierdzono żadnych pęknięć [17].

4.2. Klej poliakrylowy i polimetakrylowy

Reprezentantem tej grupy może być np. klej "Eastman 910", którego podstawą jest 2-cyanoakrylan metylu [21]. Polimeryzacja kleju w cienkiej spoinie zachodzi łatwo bez udziału katalizatora w temperaturze pokojowej w obecności śladów wilgoci.

Czas sklejanía szkła - 10-30 sek,
" " stali - 2-4 min.

Maksymalną wytrzymałość spoina osiąga po 3-5 dniach. Klej działa szkodliwie na skórę i oczy. Przyczepność kleju do szkła jest bardzo duża - jedna z największych, jakie dotychczas osiągnięto. Podobnymi klejami są: "Corialgrund", "Plex-toll", "Plexigum" i inne. Kleje należące do tej grupy są stosunkowo drogie.

Wytrzymałość na rozciąganie przy klejeniu stali wynosi:
po 2 godzinach - 141 kg/cm^2 ,
po 48 " - 354 "
a na ścinanie ok. 155 kg/cm^2 .

Spoiny zachowują swą pełną wytrzymałość w naszych warunkach klimatycznych, są natomiast nieodporne na wysoką wilgotność.

Technologia klejenia jest bardzo prosta. Wymaga się odtłuszczenia powierzchni szkła i zastosowania ciśnienia normalnego na tzw. styk. Po kilku minutach złącze jest gotowe.

4.3. Kleje epoksydowe

Zatrzymamy się jedynie przy klejach utwardzanych na zimno. Grubość spoiny zalecana przy klejeniu szkła wynosi 0,1 mm. Zużycie powierzchniowe przy klejeniu szkła wynosi 140÷160 g/m², natomiast dla powierzchni porowatych - 160÷180 g/m².

Powleczone powierzchnie należy składać ze sobą kiedy klej jest jeszcze ciekły, dociskając tak, aby zapewnić doleganie bez przesuwania się powierzchni względem siebie. Wystarczy przy tym ciśnienie 0,2 kG/cm².

Do kleju można dodawać napełniaczy mineralnych np. mączki kwarcowej w ilości 30-40 cz. wag. na 100 cz. wag. kleju. Ilości te nie wpływają na obniżenie wytrzymałości spoiny.

Łączenie materiałów o różnych współczynnikach rozszerzalności cieplnej np. metalu i szkła jest utrudnione, gdyż przy zupełnie sztywnej spoinie zmiany temperatury powodują pęknięcie szkła.

Spoiny o zwiększonej wytrzymałości można otrzymać poprzez modyfikację żywicy epoksydowej żywicą fenolową.

Do utwardzania "na zimno" żywic epoksydowych służą głównie wieloaminy alifatyczne oraz pochodne amin o mniejszej toksyczności a także poliamidy.

Do klejów utwardzanych "na zimno" stosowane są zwykle żywice wieloaminami alifatycznymi w ilości 8-10 cz.wag. na 100 cz. wag. żywicy. Ilość aminy musi być dokładnie dobrana do ilości grup epoksydowych w żywicy i przebadana, gdyż nadmiar aminy obniża wytrzymałość spoiny. Utwardzanie w temperaturze normalnej trwa 1-3 dni, a optymalną wytrzymałość uzyskuje się po 7 dniach. W celu zmniejszenia lepkości stosuje się rozcieńczalniki lub zmiękczacze - dają one równocześnie elastyczność spoiny. Za granicą stosuje się żywice epoksydowe o takich m.in. nazwach handlowych jak: "Araldit 101" i "Epoxy 1200" służące do łączenia szkła z metalem, przy czym ze względu na niską temperaturę utwardzania nie występuje pęknięcie szkła. Kleje te należy utwardzać koniecznie w temperaturze wyższej niż 15°C.

Trzeba zaznaczyć, że wytrzymałość mechaniczna i odporność chemiczna prawie wszystkich tych klejów utwardzanych w temperaturze normalnej jest zawsze nieco mniejsza od klejów utwardzanych na gorąco. Umiarkowane podwyższanie temperatury przy utwardzaniu "na zimno" znacznie zwiększa wytrzymałość. Wytrzymałość spoiny wykonanej z żywicy epoksydowej "Epoxy 1200" przy łączeniu na nakładkę wynosi 200 kG/cm². Przy obciążeniu dynamicznym wytrzymałość spada do wartości 65 kG/cm².

Klasyczna receptura kleju epoksydowego:

100 cz.wag. żywicy epoksydowej ciekłej lub
100 cz.wag. żywicy stałej stopionej z 20 cz. ftalanu butylowego
+ 10 cz. trójetylenoczteroaminy.

Czas utwardzania: 3-5 dni w temperaturze otoczenia lub 6-2 godzin w temperaturze do 60°C. Ostatnio coraz większe zastosowanie mają żywice epoksydowe modyfikowane żywicami poliamidowymi. Odznaczają się one dużymi przyczepnościami. Przedstawicielem tej grupy klejów jest "Sicomet A" [14], [23]. Jest to klej dwuskładnikowy zawierający płynną żywicę epoksydową (60 cz.wag.) i utwardzacz - żywicę poliamidową (40 cz.wag.). Czas utwardzania w temperaturze 20°C wynosi 24 godziny. Należy zastosować docisk 0,6 kg/cm². Klej o nazwie "Sicomet P" osiąga pełną wytrzymałość spoiny po 24 godzinach w temperaturze 15°C.

Z krajowych dostępnych żywic epoksydowych należy wymienić

a) klej utwardzany "na zimno" tzw. "sztywny"

Skład: Żywica "Epidian 5" - 100 cz.wag.
Utwardzacz "TECZA" - 10-11 cz.wag.

Kompozycja ta w temp. 18°C ma "czas życia" 0,5-1,5 godz. Gotowy klej nanosi się cienką warstewką na obie powierzchnie, łączy ze sobą i lekko dociska. Utwardzanie trwa 10-14 godz. Maksymalną wytrzymałość osiąga się po 7 dniach. Przy prawidłowym sklejeniu na zimno osiągnano w ITS - Warszawa wytrzymałość na ścinanie- np. dla stali-100+150 kg/cm².

Przy stosowaniu "Epidianu 5" otrzymuje się połączenie sztywne - mało elastyczne. Stosuje się je w tzw. konstrukcjach sztywnych. W temp. 70-80°C wytrzymałość spoiny spada ok. 50%. Klej nie nadaje się do łączenia dużych elementów (duża wiskoza). Dla zmniejszenia wiskozy można zastosować rozcieńczenie ftalanem dwubutyli w ilości 10-20%. Rozcieńczalnik należy mieszać z żywicą a następnie dodawać utwardzacz.

b) klej utwardzany "na zimno" (elastyczny)

Skład: "Epidian 5" - 100 cz.wag.
Poliaminoamid C - 100 cz.wag.

Klej można utwardzać w temperaturze 18°C. Czas utwardzania: 2-3 doby. Ten typ kleju nadaje się dobrze do połączeń narażonych na odkształcenia. Wytrzymałość na ścinanie połączenia np. guma-aluminium wynosi średnio 70-100 kg/cm².

Z uwagi na dużą lepkość utwardzacza rozcieńcza się kompozycję styrenem w ilości 5-10% lub ftalanem dwubutyli w ilości 10-15%. Klej świetnie zachowuje się w temperaturze poniżej 0°C.

c) klej "Epidian 101"

Jest to żywica epoksydowa z dodatkiem cykloheksanolu. Utwardza się "na zimno" i stosuje się do klejenia dużych płaskich powierzchni.

4.4. Kleje poliuretanowe

Przewiduje się, że zostaną one również zastosowane do układów szkło-szkło i szkło-stal.

Są klejami dwuskładnikowymi zawierającymi tzw. "Desmodur" tj. dwu- lub trójizocyjanian i "Desmocoll" tj. poliester zawierający wolne grupy wodorotlenowe.

Tak np. kompozycja składająca się z: "Desmocollu 12" i "Desmoduru T H" daje przy sklejeniu stali:

wytrzymałość na rozciąganie ok. 480 kg/cm^2 ,

" na ścinanie ok. 320 kg/cm^2 .

Kleje te przy odpowiednim doborze składników wiążą w niskich temperaturach, nawet poniżej 0°C . Około 80% wytrzymałości osiąga się w ciągu 12-48 godzin.

Kleje poliuretanowe są bardzo ciekawe i godne gruntownego przebadania. Technologia ich została opracowana przez ITS - Warszawa. Szczególnie "Desmodur O" nadaje się do klejenia szkła.

4.5. Kleje oparte o kopolimery butadienonitryloakrylowe o dużej zawartości akrylonitrylu 17

Za granicą są znane pod nazwą handlową "Pliobond". Z tej grupy odmiana "Pliobond" - M 190 C zalecana jest przez producentów jako klej do szkła o dobrej elastyczności spoiny. Powlekanie klejem powierzchni łączonych elementów odbywa się przy pomocy pistoletu. Po wyschnięciu kleju na powietrzu zwiera się łączone powierzchnie ze sobą i utrzymuje w temperaturze $90-160^\circ\text{C}$ pod ciśnieniem $7-20 \text{ kg/cm}^2$. Dla szkła temperatura utwardzania może wynosić 50°C a ciśnienie do 1 kg/cm^2 .

4.6. Kleje polioctanowinylowe w mieszaninie z żywicami alkiidowymi (gliceroftalowe lub polialkilomaleinowe)

Odznaczają się one doskonałą przyczepnością do szkła. Podobnie doskonałą adhezję do szkła ma klej sporządzony z polioctanowinyli i zmieszany ze zhydrolizowanymi estrami kwasu krzemowego.

5. Technologia klejenia szkła

Można spotkać się z opinią, że klejenie jest zabiegiem bardzo prostym. W rzeczywistości jest to proces nieco skomplikowany, wymagający znajomości własności tworzywa klejonego, własności kleju, mechanizmu procesu utwardzania, wytrzymałość

ści spoiny klejowej i jej odporności na działanie czynników zewnętrznych. Bardzo często niepowodzenie przypisuje się złej jakości kleju, podczas gdy w rzeczywistości przyczyny mogą leżeć po prostu w nieumiejętności posługiwania się nim. Proces klejenia możemy podzielić na następujące operacje:

- przygotowanie powierzchni tworzywa klejonego,
- przygotowanie masy klejowej,
- powlekanie powierzchni masą klejową,
- suszenie,
- utwardzanie,
- kondycjonowanie,
- wykańczanie.

5.1. Przygotowanie powierzchni tworzywa klejonego

Wiemy już, że zasadnicze znaczenie dla wytrzymałości połączenia klejonego ma przyczepność właściwa. Dlatego przy sklejeniu wszelkich materiałów ważną czynnością jest odpowiednie przygotowanie powierzchni. W przypadku szkła różnice wytrzymałości spoiny spowodowane niewłaściwym przygotowaniem powierzchni mogą niekiedy przekroczyć 100%. Przy sklejeniu szkła, które jest tworzywem nieporowatym zasadniczo nie zachodzi potrzeba rozwijania jego powierzchni i problemy oczyszczania, aczkolwiek ważne, nie są tak decydujące jak w przypadku klejenia metali.

Przygotowanie powierzchni szkła można przeprowadzać następująco:

odtłuścić powierzchnię przez obmycie w kąpeli: benzyny, trójchloroetylenu ("tri") lub roztworu sody, lub dokładniej w mieszaninie składającej się z 27% stęż. kwasu siarkowego, 3% dwuchromianu sodu i 70% wody; po kąpeli w takiej mieszaninie trwającej około 15 minut, szkło należy opłukać w zimnej a następnie gorącej wodzie destylowanej i suszyć w temperaturze 105°C, po czym schłodzić do temperatury otoczenia.

Po odtłuszczeniu można modyfikować powierzchnię szkła w kierunku uzyskania warstewki pierwotnej, o czym była już uprzednio mowa.

5.2. Przygotowanie masy klejowej

Tylko nieliczne kleje nadają się w formie gotowej do bezpośredniego stosowania. Wiele z nich trzeba odpowiednio przyrządzać. Rozpuszczanie kleju w odpowiednim rozpuszczalniku należy przeprowadzić starannie, aby otrzymać właściwą konsystencję. Zbyt rozcieńczony klej daje tzw. spoinę "chudą", a za gęstą spoinę "grubą", co pociąga za sobą złe zwilżenie, złe schnięcie, zbyt duże naprężenia. W zasadzie należy kierować się wskazaniem producenta kleju, gdyż przepisy w tym

zakresie są zróżnicowane. Często prowadzi się próbne przygotowanie kleju celem sprawdzenia schnięcia. W celu zmniejszenia niepożądaney płynności kleju, utrudniającej klejenie nieściśle przylegających do siebie powierzchni (przypadek zachodzący przy sklejaniu większych elementów szkła), dodaje się do kleju napełniaczy mineralnych. Prawidłowo dobrane poprawiają one zawsze własności kleju w odróżnieniu od obciążalników, które pogarszają własności klejące. Obciążalniki - w przeciwieństwie do napełniaczy - zachowują się obojętnie w procesie klejenia. Również istotnym momentem jest dodawanie utwardzaczy - od tej czynności zależy prawidłowy przebieg procesu twardnienia spoiny i jej ostateczna wytrzymałość. Przeważnie do handlowego typu kleju podane są przepisy producenta dotyczące sposobu utwardzania. W wielu przypadkach żywica jest zbyt gęsta aby mogła być stosowana. Np. żywica epoksydowa o zawartości grup epoksydowych ok. 0,57 gram równoważnik/100 g charakteryzuje się w temperaturze 20°C lepkością wynoszącą około 15000 cP. Konieczne jest wtedy obniżenie lepkości nie powodujące jednak pogorszenia własności utwardzanego tworzywa. Może to być osiągnięte przez dodanie związków chemicznych łatwo rozpuszczających żywicę i posiadających przy tym małą lepkość.

Są stosowane:

- a) rozcieńczalniki nieaktywne - tzn. takie, które nie posiadają grup aktywnych do reakcji z żywicą podstawową lub utwardzaczami (np. dla żywic epoksydowych mogą to być: ksylen, ftalan dwubutyłowy - 15±20% cz.wag. kompozycji utwardzanych na zimno),
- b) rozcieńczalniki aktywne, które biorą udział w procesie utwardzania wbudowując się w przestrzenną strukturę żelu (np. dla żywic epoksydowych mogą to być tlenek styrenu lub etery jedno- i wieloglicydowe).
Przy operacjach związanych z przygotowaniem masy klejowej należy zwrócić uwagę na prawidłowe wymieszanie komponentów, szczególnie przy kompozycji klejów wieloskładnikowych.

Zaleca się dodawanie do masy klejowej substancji przyspieszających utwardzanie w końcu okresu przygotowania kleju i zbadanie czasu użytkowania masy klejowej.

5.3. Powlekanie klejem powierzchni tworzywa

Kleje, jakie stoją do dyspozycji, mogą być w postaci cieczy, pasty i proszku. Przy omawianiu technologii klejenia szkła pozostaniemy przy klejach ciekłych i w postaci past

Kleje ciekłe nakładamy na powierzchnię przez rozsmarowanie pędzlem, rozpylanie pistoletem lub zanurzanie elementu w ciekłym kleju. Kleje o konsystencji pasty nakłada się przy pomocy łopateczki lub wałka i rozsmarowuje na powierzchni.

Nacisk, temperatura i czas klejenia decydują o wytrzymałości spoiny. Najczęściej dla odpowiedniego kleju parametry te ustala się drogą doświadczalną o ile nie zostały podane w recepturze kleju przez producenta.

Nacisk przy klejeniu zbyt mały daje spoinę grubą o dużej ilości pęcherzyków powietrza i małej wytrzymałości. Zbyt duży nacisk powoduje przesadne wypływanie kleju. Docisk przy klejeniu szkła ma powodować usunięcie pęcherzyków powietrza zamkniętych między sklejanymi powierzchniami. Dla tworzyw nieporowatych, do których nałoży szkło, grubość spoiny powinna wynosić poniżej 0,1 mm. Powiększenie spoiny ponad 0,5 mm powoduje spadek wytrzymałości o 50-70%. Każda spoina winna być oprócz tego jednolita i ciągła.

Drugim ważnym parametrem jest temperatura. Jeśli współczynnik rozszerzalności cieplnej warstwy klejowej różni się znacznie od współczynnika rozszerzalności cieplnej substancji sklejaney, to przy zmianie temperatury w spoinie wystąpią znaczne naprężenia wewnętrzne, mogące spowodować zniszczenie spoiny. Dlatego często uciekamy się do takiego sposobu, że dodajemy do kleju substancji mocno sproszkowanych (Al_2O_3 , azbest, proszek kwarcowy), dzięki czemu zmniejsza się różnica pomiędzy współczynnikami rozszerzalności cieplnej kleju i klejonego tworzywa.

Dla orientacji podajemy współczynniki rozszerzalności niektórych gatunków szkła i żywic (tablica 2).

Tablica 2

Tworzywo	liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej $\times 10^{-6}$
Szkło okienne	9 - 10
Flint barowy	8,8
Crown lekki	10,4
Flint lekki	8,8
Żywica fenol-formaldehydowa	25 - 60
Żywica epoksydowa	60 - 70

Szkodliwy wpływ wzrostu temperatury przejawia się w zwiększeniu plastycznego płynięcia kleju oraz w silniejszym kurczeniu się spoiny wskutek przyspieszonego tężenia. Przy wzroście temperatury zmieniają się również reologiczne własności kleju.

5.4. Suszenie masy klejowej

Moment złączenia powleczonych ciekłym klejem rozpuszczalnikowym powierzchni poprzedzony bywa zazwyczaj okresem wstępnego podsuszania warstwy klejowej, który nazywamy "czasem otwartym" lub schnięciem otwartym. W okresie tym zachodzi odparowanie znacznej ilości rozpuszczalnika z warstewki klejowej. Złączenie części klejonych winno nastąpić w momencie, kiedy warstwa klejowa osiąga stan największej przylepności, co stwierdza się przez tzw. próbę "na palec". Zbyt krótkie lub zbyt długie "otwarte schnięcie" jest szkodliwe. Prawidłowy okres schnięcia otwartego należy ustalić drogą prób. Czas trwania "otwartego schnięcia" zależy nie tylko od lotności rozpuszczalników, lecz także od temperatury wilgotności powietrza, przewiewu itp. Średni czas "otwartego schnięcia" wynosi ok. 3 godzin w temperaturze normalnej.

5.5. Utwardzanie kleju

Jest to bardzo ważna operacja. Od sposobu przeprowadzenia tej czynności zależy wytrzymałość złącza. Decydującymi parametrami są: temperatura, czas utwardzania, nacisk. Grają tu również istotną rolę wilgotność powietrza oraz intensywność wentylacji pomieszczenia, w którym schną klejone elementy.

5.6. Kondycjonowanie

Sprowadza się do pozostawienia sklejonych elementów danego tworzywa przez pewien czas w warunkach otoczenia w celu wyrównania naprężeń wewnętrznych w spoinie i osiągnięcia maksymalnej stałej wytrzymałości spoiny. Tak np. dla żywic epoksydowych utwardzanie w temperaturze normalnej trwa 1-3 dni a optymalną wytrzymałość uzyskuje się po około 7 dniach.

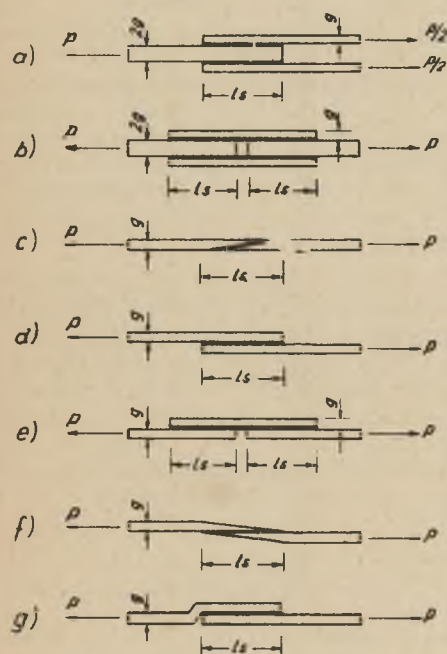
5.7. Wykańczanie

Operacja ta polega na oglądnięciu elementów sklejanych i sprawdzeniu czy w wyniku wadliwie prowadzonego klejenia nie nastąpiły zjawiska opisane przy omawianiu tzw. "chudych" i "grubych" spoin. W zależności od przeznaczenia elementu sklejonego może być potrzebne oszlifowanie wycieków, wypolerowanie, polakierowanie itp.

6. Możliwości zastosowań połączeń klejonych w konstrukcjach budowlanych

Łączenie elementów za pomocą klejenia zostało dotychczas najbardziej rozpowszechnione w konstrukcjach drewnianych. Są już również w eksploatacji eksperymentalne klejone konstrukcje stalowe [12], [16]. Typy połączeń mogące znaleźć zastosowanie w konstrukcjach stalowych przedstawiono na rys. 1. W

połączeniu b) nakładki mogą być zukosowane. Jeśli wymagana jest płaskość powierzchni elementu po sklejeniu, to można zastosować nakładki wpuszczone lub zakładkę wpuszczoną, jak to pokazano na rys. 2. Możliwości konstruowania klejonych ustrojów zginanych zostały zilustrowane na rys. 3. Przedstawiono tu naroża przekrojów zamkniętych, przekrój zamknięty dźwigara złożonego z dwóch profili cienkościennych, przekrój blachownicy i ustroj warstwowy (płyta lub powłoka).

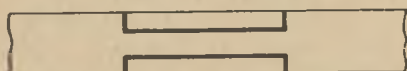


Rys. 1

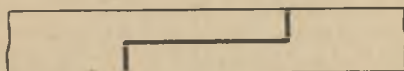
Bardzo ciekawą i obiecującą dziedziną zastosowań klejów są wielomateriałowe konstrukcje warstwowe. Bardzo intensywne badania tego rodzaju konstrukcji prowadzone są w ZSRR [7], USA, Anglii, NRF, NRD [16], Francji i in. Znalazły one już zastosowanie w ścianach, stropach i dachach wielu obiektów doświadczalnych.

Przykłady konstrukcji warstwowych pokazano na rys. 4. Najczęściej warstw jest trzy. Skrajne warstwy połączone odpowiednimi żeberkami i ramkami przenoszą siły wewnętrzne (w płycie stropowej lub dachowej górna warstwa przenosi ściskanie, dolna zaś rozciąganie), natomiast rdzeń spełnia rolę izolacji. Może on też uczestniczyć w przenoszeniu obciążeń jeśli ma odpowiednią budowę (przypomina np. plaster pszczeli lub jest płytą falistą) i został odpowiednio połączony z warstwami pokrywającymi. Warstwy skrajne mogą być metalowe (najczęściej aluminium), azbestocementowe lub też mogą być wykonane z żywicy zbrojonej włóknem szklanym. W warstwie środkowej może być papier (w postaci plastra) przesycony żywicą, tworzywo sztuczne porowate, beton komórkowy (gazobeton lub pianobeton), wełna mineralna itp.

Łatwo zauważyć, że w wielomateriałowych konstrukcjach klejonych może znaleźć zastosowanie szkło w postaci płyt i kształtowników. Biorąc pod uwagę wysoką wytrzymałość szkła



a) połączenie na nakładki
wpuszczone



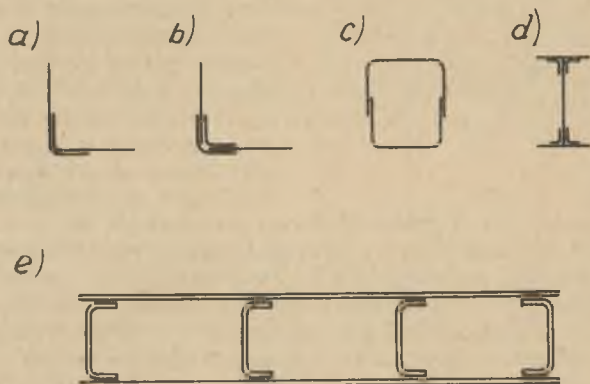
b) połączenie na zakładkę
wpuszczoną

Rys. 2

na rys. 1. Należy tu dać pierwszeństwo połączeniom pracującym na ścinanie przy ściskaniu (rys. 5). Sposób badania wytrzymałości połączeń szkła winien być także dostosowany do

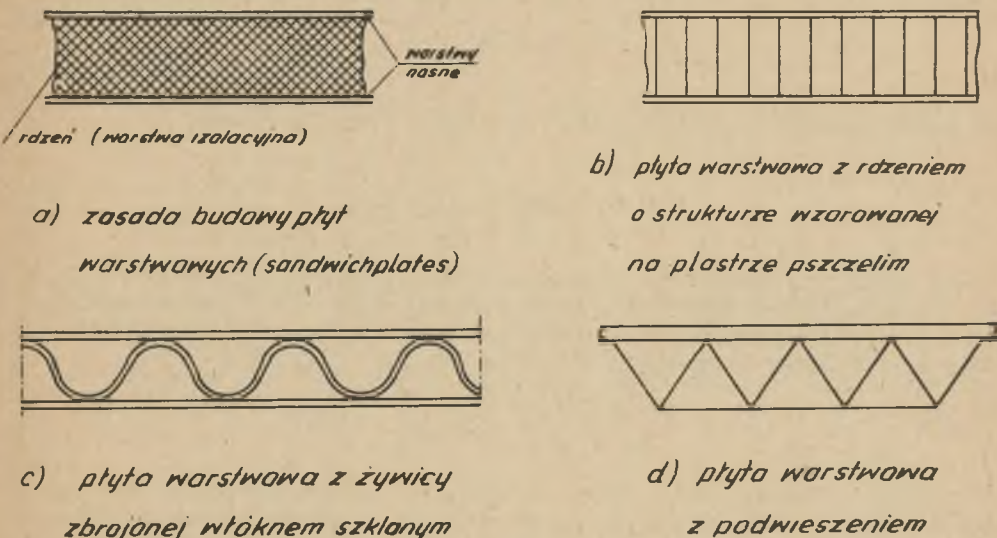
na ściskanie można wykonać z niego górny pas dźwigara przedstawionego na rys. 3d, można też wykorzystać go na warstwy licowe wielomateriałowych płyt ściennych lub na warstwę górną (ściskaną) takichże płyt dachowych. Nie wyczerpuje to oczywiście wszystkich możliwości konstrukcyjnych zastosowań szkła. Pierwsze próby belek szklanych sprężonych i belek szklano-stalowych wykonane w Katedrze Budowli Komunalnych dały wyniki zachęcające do dalszych badań.

Szkło, posiadające stosunkowo niewielką wytrzymałość na rozciąganie może mieć tylko ograniczone zastosowanie w połączeniach przedstawionych

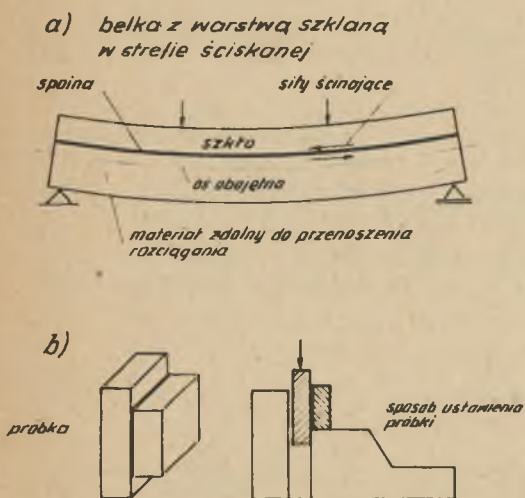


Rys. 3

jego własności. Najbardziej racjonalnym wydaje się schemat badania pokazany na rys. 5b.



Rys. 4



Badanie wytrzymałości połączenia na ścinanie przez ściskanie

Rys. 5

Teoria połączeń klejonych nie została jeszcze w pełni opracowana. Ponieważ wytrzymałość tych połączeń zależy od wielu czynników takich jak: cechy kleju, cechy fizykochemiczne łączonego tworzywa, kształt i wymiary złącza, rodzaj sił wewnętrznych, charakter obciążenia elementu klejonego, czas i charakter środowiska, więc zadowalająca metoda obliczania nośności, czy też sprawdzania konstrukcji klejonych może być opracowana dopiero po nagromadzeniu wyników badań.

Spotykane w literaturze ujęcia teoretyczne dotyczą najczęściej połączeń pracujących na ścinanie przy rozciąganiu (złącza blach i płaskowników) [16]. I tak np.

optymalną długość zakładki l_s (por. rys. 1) przedstawia się jako iloczyn współczynnika doświadczalnego m i granicy plastyczności Q_r , czyli

$$l_s = m Q_r \quad (1)$$

Ogólnie biorąc współczynnik m może być iloczynem

$$m = m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_i \quad (2)$$

przy czym poszczególne czynniki uwzględniają określone wpływy decydujące o wytrzymałości połączenia. M.in. zależność optymalnej długości zakładki od grubości blachy g określono doświadczalnie w postaci współczynnika składowego [16]

$$m_1 = 0,2 (g^2 + 1) \quad (3)$$

Na drodze eksperymentalnej ustalono dla określonych połączeń współczynniki odzwierciedlające wpływ czasu, zmienności obciążenia itp. Empirycznie został również znaleziony tzw. współczynnik połączenia de Bruyna wyrażany wzorem

$$f_p = \frac{\sqrt{g}}{l_s} \quad (4)$$

i służący do porównywania wytrzymałości połączeń wykonanych w identyczny sposób (przy użyciu tego samego tworzywa, tego samego kleju, przy zachowaniu stałej grubości spoiny i stosowaniu jednakowego procesu technologicznego).

Jeśli zostały wykonane badania połączenia i ustalono niszczące naprężenie ścinające τ_n , to naprężenie dopuszczalne w spoinie

$$\tau_{dop} = \frac{\tau_n}{s} \quad (5)$$

Licząc się np. z 20-procentowym rozrzutem wyników badań i przyjmując współczynnik bezpieczeństwa $s = 1,5$ otrzymamy

$$\tau_{dop} = 0,53 \tau_n \quad (6)$$

Nie można jeszcze podać wskazówek dotyczących obliczania połączeń klejonych, w których występuje szkło. Będzie to w pewnym stopniu możliwe po zakończeniu badań takich połączeń prowadzonych w Katedrze Budowli Komunalnych Politechniki Śląskiej.

LITERATURA

- [1] Basiewicz P., Dulnicz S.: "Klejone połączenia stali z betonem" - Inżynieria i Budownictwo 1964, nr 2.
- [2] Brunt N.A.: "Adhesion between viscoelastic and hard materials" - J.appl.Polym. Sc 1962, t.6, nr 23, str.548-557.
- [3] De Bruyne-Houwink: "Klebeteknik" - Stuttgart 1957.
- [4] Czistiakow A., Suchariewa L., Kowalczyk L., Kisilew M.: "Issledowanje wnutriennich napriazienij w klejowych sojedinenijach" - Płast.Massy 1964, nr 1, str. 57-59.
- [5] Dunkley G.T.: "The Silicone finishes" - Ind. Finishing (London) 1, 24-6 (1948), Chem.Abs 43, 2632, (1949).
- [6] Espe W.: "Hmoty pro elektrotechniku" - Praha 1950, rozdział 21 - szkło.
- [7] Gubienko A.: "Technologija izgotowlenija klejenich panieliej iz płastmass, aluminija, asbestocementa i bionta", - Moskwa 1963.
- [8] Gul W., Zaborowskaja J., Dancowa E., Bubnowa B.: Issledowanije adgiezji tiernorieaktywnych polimierow k stieklu" - Wysokomol. Sojed. 1963, nr 2, str. 269-172.
- [9] Iskra J.: "Co i jak produkować z tworzyw sztucznych" - str. 317 - Kleje. Warszawa, 1959.
- [10] Kardaszow D.A.: "Sintieticzieskije klei" - Moskwa 1964.
- [11] Kozłowski A.: "Kleje syntetyczne" - Warszawa 1950.
- [12] Mathes H.: "Metallkleben" - Der Bauingenieur, 1964, nr 5 str. 196.

- [13] Moser F.: ASTM Bulletin (1948), 150, 51, (1950) 169, 62.
- [14] Pohl A.: "Metallkleben - ein neuzeitliches Verbindungsmittel" - Techn. Rundschau 1960, nr 1, 7 i 14 oraz 1961 nr 2 i 7.
- [15] Rybak M., Dec T.: "Wstępne doświadczenia nad stosowaniem Epidianu 3 do łączenia prefabrykatów" - Inżynieria i Budownictwo 1964, nr 2.
- [16] Schwarz H., Schlegel H.: "Metallkleben und Glasfaserverstärkte Kunststoffe" - Verlag Technik, Berlin 1962.
- [17] Siemiaszko A., Porejko S.: "Kleje naturalne i syntetyczne" - Warszawa 1961.
- [18] Valentine J.: "How to assure successful metal and glass joints" - Adhesives Age 1962, t.5, nr 12, str. 26-30.
- [19] Weggemans D.: "Het lijmen van polyformaldehyde kunststoffen" - 1964, t.17, nr 1, str. 18-23.
- [20] "Kunststoff u. Betonverklebung" Adhäsion 1964, nr 1, str. 26.
- [21] Symposium: "Haftsysteme u. Haftfestigkeit", - Adhäsion 1964, nr 6, str. 239-242.
- [22] Gummi u. Asbest 6, 399 (1959).
- [23] "Klebemitteltypen, deren Eigenschaften und Vorbereitungsbedingungen" - Kunststoff - Dokumentum, rozdział 63-4-01/1.

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

С о д е р ж а н и е

Постоянный недостаток стали, проявляющийся между прочим в строительстве, приводит к поискам конструктивных решений дающих возможность применения более дешевых и более доступных материалов чем этот ценный металл. Кажется, что одним из таких материалов может явиться стекло.

Этот вопрос достоин более глубокого анализа и соответствующих исследований, которые уже начались в Кафедре Городских Сооружений Силезского Политехнического Института. В связи с этими исследованиями возникла задача разработки надежных соединений типа стекло - стекло, стекло - металл, стекло - бетон и других.

В работе обращено внимание на клеевые соединения стекла. Кроме физикохимической сущности этих соединений обсуждено наиболее распространенные синтетические клеи и технологии склеивания. В конце работы дано краткие сведения о прочности клеевых соединений.

NEW POSSIBILITIES OF THE BINDING OF MATERIALS

S u m m a r y

Continuous deficit of steel, noticed also in the building, is the reason for making researches of constructions in which this valuable material can be replaced with cheaper and more attainable materials. It seems that the glass can be one of such materials.

This problem is worth for a deeper analysis and suitable researches, which are already undertaken by the Chair of the Communal Building of the Silesian Polytechnic School. In connection with the above there has arisen the problem of binding glass with glass, glass with steel, glass with concrete etc.

In this article special attention has been paid to the binding of glass. After the description of the binding's principles, also the sythetic glues, as well as the binding's technology have been discussed. At the end of this article the strength of the glue - binding has been described.