

Marek Kozielczyk

Evaluation of selected properties of welded joints in PVC profiles for civil engineering applications

Abstract

This thesis examines how welding conditions influence the weld structure formed in hybrid unplasticized poly(vinyl chloride) (PVC-U) window profiles reinforced with a glass-fibre composite insert. Such hybrid profiles are of growing interest in civil engineering, where structural reliability and long-term durability are essential performance requirements. In this configuration, the weld zone becomes an interaction region between constituents with markedly dissimilar thermomechanical responses, so the process settings govern not only joint load-bearing capacity but also the propensity for irreversible changes within the weld material and the heat-affected zone. The central objective was therefore to determine how processing conditions influence the resulting weld-zone structure and to delineate a stable processing window that delivers repeatable joint quality without indications of material degradation.

The work comprises a theoretical section that primarily systematises the relevant material and technological constraints, followed by an experimental programme structured into three complementary stages. The first stage focused on the constituent materials of the profile and provided the baseline required to interpret phenomena within the weld. The second stage consisted of pilot trials aimed at selecting welding parameters and identifying the boundaries of process stability. The third, principal stage delivered a multi-method verification of weld-zone changes using hardness testing, microscopy, DSC, and FTIR-ATR.

The preliminary investigations demonstrated a pronounced asymmetry in the thermomechanical behaviour of PVC-U and the composite insert during welding, since PVC-U underwent plasticisation while the glass-fibre composite remained essentially dimensionally stable due to its substantially higher effective melting or softening threshold. The composite contained approximately 52% glass fibre by mass and, relative to PVC-U, exhibited markedly higher stiffness and strength alongside an extremely limited strain capacity. Thermal testing corroborated this mismatch in the welding context, because the heat deflection temperature of PVC-U was several times lower than that of the composite despite similar Vicat softening temperatures. During plasticisation and bead formation, these disparities between those materials promote non-uniform compliance and local stress concentration at the joint, which necessitates operating within a tightly controlled parameter window.

During the pilot stage, joint quality was assessed concurrently in mechanical terms through failure load, in geometric terms through symmetry and dimensional deviation, and in qualitative terms through bead continuity, weld bead colour, and overload events. The results showed that welding-head kinematics act as the governing control variable. Within the investigated range, a head feed rate of 0.25 mm/s provided the most favourable compromise between load-bearing performance and process stability when compared with 0.19 mm/s and 0.31 mm/s. In parallel, machining of the composite by milling proved to be a boundary condition for quality. Milling depths above 1.0 mm produced bead discontinuities and

disqualified the welds despite locally high failure loads, whereas a depth of 1.0 mm delivered the best repeatability while preserving joint integrity. The analysis of temperature and plasticisation time further indicated that reducing temperature, down to 247 °C with a melting time of 30 s, progressively narrowed the stability margin until geometric nonconformities and machine overload errors emerged. By contrast, shortening the melting time to 22 s at 264 °C remained feasible without loss of quality, whereas further reduction to 21 s, compensated by increasing temperature into the 270–280 °C range, led to bead discoloration and symptoms of thermal overloading, indicating a technologically unacceptable intensification pathway. On this basis, a processing window was established comprising welding at 264 °C with a melting time of 22 s, a head feed rate of 0.25 mm/s, and milling of the composite insert to a depth of 1.0 mm.

In the principal stage, the combined evidence from hardness testing, microscopy, DSC, and FTIR-ATR demonstrated that reducing the melting time from 30 s to 22 s at 264 °C preserved the material integrity of the weld zone relative to the reference condition. For welds produced between 256 °C and 264 °C, hardness remained at approximately 65–75 N/mm², and no statistically meaningful difference was detected between the welds produced at 264 °C with a melting time of 22 s and those produced at 264 °C with a melting time of 30 s, although weld hardness was lower than that of the parent PVC. Microscopy confirmed the absence of degradation features in welds produced between 256 °C and 264 °C, whereas the boundary condition of 270 °C with a melting time of 21 s produced discoloration penetrating into the weld bead, interpreted as evidence of PVC degradation. DSC provided no basis to conclude that welding at 264 °C with a melting time of 22 s induced any distinct structural change from the reference condition at 264 °C with a melting time of 30 s, as the observed differences were subtle and local. The decisive confirmation of chemical stability within the weld zone was delivered by FTIR-ATR spectra. Comparing welds produced at 264 °C with melting times of 22 s and 30 s revealed neither the emergence of new bands nor the disappearance of diagnostic bands, supporting the conclusion that the chemical type of the weld material remains unchanged within the recommended processing window.

The principal scientific contribution of the dissertation is the establishment of a quantitatively substantiated relationship between welding-process variables and the mechanical response of welded corners in PVC-U profiles reinforced with glass-fibre composite inserts, while demonstrating that this response cannot, by itself, define process acceptability. The regression-based part of the study showed that failure load varies systematically with welding temperature and melting time within the investigated process domain, thereby providing a basis for model-supported interpretation of the strength response. Its significance lies not in replacing technological qualification, but in demonstrating that strength prediction must be integrated with dimensional stability, weld morphology, and verification of the material state within the weld zone. The convergence of failure-load results, microscopic observations, DSC response, and FTIR-ATR spectra demonstrated that reducing the melting time from 30 s to 22 s at 264 °C does not induce detectable adverse material or microstructural changes in the weld zone relative to the reference condition produced at the same welding temperature. Overall, the dissertation provides implementable recommendations for the design and control of welded corner joints in civil-engineering applications, delineates a technological window for hybrid PVC-U/composite profile systems, and demonstrates that parameter selection must integrate strength-based criteria with material-state indicators of safety. Conditions that appear acceptable when evaluated solely by failure load may nevertheless initiate degradation processes that remain beyond the resolution of the failure-load metric alone.

Marek Kozielczyk

Evaluation of selected properties of welded joints in PVC profiles for civil engineering applications

Streszczenie

Niniejsza rozprawa dotyczy wpływu warunków zgrzewania na strukturę zgrzeiny powstającej w hybrydowych profilach okiennych z nieplastyfikowanego poli(chlorku winylu) (PVC-U), wzmacnianych wkładką kompozytową z włóknem szklanym. Tego rodzaju profile hybrydowe zyskują coraz większe znaczenie w budownictwie, gdzie niezawodność konstrukcyjna i trwałość długoterminowa stanowią zasadnicze wymagania użytkowe. W analizowanej konfiguracji, strefa zgrzeiny staje się obszarem oddziaływania składników o wyraźnie odmiennych odpowiedziach termomechanicznych. Parametry procesu determinują zatem nie tylko nośność połączenia, lecz także podatność materiału zgrzeiny i strefy wpływu ciepła na występowanie zmian nieodwracalnych. Głównym celem pracy było w związku z tym określenie, w jaki sposób warunki technologiczne wpływają na strukturę strefy zgrzeiny, oraz wyznaczenie stabilnego okna procesowego zapewniającego powtarzalną jakość połączenia bez oznak degradacji materiału.

Praca obejmuje część teoretyczną, ukierunkowaną przede wszystkim na usystematyzowanie istotnych uwarunkowań materiałowych i technologicznych, oraz program badań eksperymentalnych podzielony na trzy komplementarne etapy. Pierwszy etap dotyczył materiałów składowych profilu i pozwolił określić stan odniesienia niezbędny do interpretacji zjawisk zachodzących w zgrzeinie. Drugi etap obejmował badania pilotażowe służące doborowi parametrów zgrzewania i identyfikacji granic stabilności procesu. Trzeci, zasadniczy etap badań, umożliwił wielometodową weryfikację zmian w strefie zgrzeiny z wykorzystaniem pomiarów twardości, mikroskopii, DSC oraz FTIR-ATR.

Badania wstępne wykazały wyraźną asymetrię zachowania termomechanicznego PVC-U i wkładki kompozytowej podczas zgrzewania. PVC-U ulegał uplastycznieniu, natomiast kompozyt z włóknem szklanym pozostawał zasadniczo stabilny wymiarowo ze względu na znacznie wyższy efektywny próg topnienia lub mięknięcia. Kompozyt zawierał około 52% włókna szklanego w ujęciu masowym i w porównaniu z PVC-U, charakteryzował się wyraźnie większą sztywnością oraz wytrzymałością, przy jednocześnie bardzo ograniczonej zdolności do odkształcenia. Badania cieplne potwierdziły tę niezgodność w kontekście procesu zgrzewania, ponieważ temperatura ugięcia pod obciążeniem dla PVC-U była kilkakrotnie niższa niż dla kompozytu, mimo zbliżonych temperatur mięknięcia Vicata. Podczas uplastyczniania i formowania wypływką zgrzeiny różnice między tymi materiałami sprzyjają nierównomiernej podatności oraz lokalnej koncentracji naprężeń w obszarze połączenia. Wymusza to prowadzenie procesu w ściśle kontrolowanym zakresie parametrów.

Na etapie badań pilotażowych jakość połączenia oceniano równocześnie w ujęciu mechanicznym, geometrycznym i jakościowym. Kryterium mechaniczne stanowiło obciążenie niszczące. Kryteria geometryczne obejmowały symetrię oraz odchyłki wymiarowe, natomiast ocena jakościowa dotyczyła ciągłości wypływką, barwy wypływką zgrzeiny, oraz występowania przeciążeń maszyny. Wyniki wykazały, że kinematyka głowic zgrzewających stanowi kluczową zmienną sterującą procesem. W badanym zakresie prędkość posuwu głowicy wynosząca 0.25 mm/s zapewniała najkorzystniejszy kompromis między

nośnością połączenia a stabilnością procesu, w porównaniu z wartościami 0.19 mm/s oraz 0.31 mm/s. Równolegle wykazano, że obróbka kompozytu przez frezowanie stanowi warunek brzegowy uzyskania wymaganej jakości. Głębokości frezowania większe niż 1.0 mm prowadziły do nieciągłości wypływki i dyskwalifikowały zgrzeiny, mimo lokalnie wysokich wartości obciążenia niszczącego. Głębokość 1.0 mm zapewniała natomiast najlepszą powtarzalność przy zachowaniu integralności połączenia. Analiza temperatury i czasu uplastyczniania wykazała ponadto, że obniżanie temperatury do 247 °C przy czasie topienia 30 s stopniowo zawężało margines stabilności procesu, aż do wystąpienia niezgodności geometrycznych i błędów przeciążenia maszyny. Z kolei skrócenie czasu topienia do 22 s przy temperaturze 264 °C pozostawało możliwe bez utraty jakości. Dalsze skrócenie czasu do 21 s, kompensowane podwyższeniem temperatury do zakresu od 270 do 280 °C, prowadziło jednak do przebarwienia wypływki oraz objawów przeciążenia cieplnego, wskazując na technologicznie niedopuszczalną ścieżkę intensyfikacji procesu. Na tej podstawie wyznaczono okno procesowe obejmujące zgrzewanie w temperaturze 264 °C przy czasie topienia 22 s, prędkości posuwu głowicy 0.25 mm/s oraz frezowaniu wkładki kompozytowej do głębokości 1.0 mm.

W etapie zasadniczym zbieżne wyniki pomiarów twardości, obserwacji mikroskopowych, DSC oraz FTIR-ATR wykazały, że skrócenie czasu topienia z 30 s do 22 s przy temperaturze 264 °C pozwala zachować integralność materiałową strefy zgrzeiny względem warunku referencyjnego. Dla zgrzein wykonanych w zakresie od 256 °C do 264 °C twardość pozostawała w przybliżeniu na poziomie 65–75 N/mm². Nie stwierdzono statystycznie istotnej różnicy między zgrzeinami wykonanymi w temperaturze 264 °C przy czasie topienia 22 s a zgrzeinami wykonanymi w tej samej temperaturze przy czasie topienia 30 s, mimo że twardość zgrzeiny była niższa niż twardość materiału rodzimego PVC. Obserwacje mikroskopowe potwierdziły brak cech degradacji w zgrzeinach wykonanych w zakresie od 256 °C do 264 °C. Warunek graniczny odpowiadający temperaturze 270 °C i czasowi topienia 21 s powodował natomiast przebarwienie wnikające w wypływkę zgrzeiny, interpretowane jako przejaw degradacji PVC. Analiza DSC nie dostarczyła podstaw do stwierdzenia, że zgrzewanie w temperaturze 264 °C przy czasie topienia 22 s wywołuje odrębną zmianę strukturalną względem warunku referencyjnego, odpowiadającego temperaturze 264 °C i czasowi topienia 30 s, ponieważ zaobserwowane różnice były subtelne oraz lokalne. Rozstrzygające potwierdzenie stabilności chemicznej w strefie zgrzeiny uzyskano na podstawie widm FTIR-ATR. Porównanie zgrzein wykonanych w temperaturze 264 °C przy czasach topienia 22 s oraz 30 s nie wykazało ani pojawienia się nowych pasm, ani zaniku pasm diagnostycznych, co wspiera wniosek, że charakter chemiczny materiału zgrzeiny pozostaje niezmienny w zalecanym oknie procesowym.

Główny wkład naukowy rozprawy polega na ustaleniu ilościowo uzasadnionej zależności między zmiennymi procesu zgrzewania a odpowiedzią mechaniczną zgrzewanych naroży profili PVC-U wzmacnianych wkładkami kompozytowymi z włóknem szklanym, przy jednoczesnym wykazaniu, że sama odpowiedź mechaniczna nie może definiować akceptowalności procesu. Część badań oparta na analizie regresyjnej wykazała, że obciążenie niszczące zmienia się systematycznie wraz z temperaturą zgrzewania i czasem topienia w badanym obszarze procesu, dostarczając podstaw do interpretacji odpowiedzi wytrzymałościowej wspieranej modelem. Znaczenie tej analizy nie polega na zastąpieniu kwalifikacji technologicznej, lecz na wykazaniu, że predykcja wytrzymałości musi być zintegrowana ze stabilnością wymiarową, morfologią zgrzeiny oraz weryfikacją stanu materiału w strefie zgrzeiny. Zbieżność wyników obciążenia niszczącego, obserwacji mikroskopowych, odpowiedzi DSC oraz widm FTIR-ATR wykazała, że skrócenie czasu

topienia z 30 s do 22 s przy temperaturze 264 °C nie powoduje wykrywalnych niekorzystnych zmian materiałowych ani mikrostrukturalnych w strefie zgrzeiny względem warunku referencyjnego uzyskanego przy tej samej temperaturze zgrzewania. Całościowo rozprawa dostarcza możliwych do wdrożenia zaleceń dotyczących projektowania i kontroli zgrzewanych połączeń narożnych w zastosowaniach budowlanych, wyznacza okno technologiczne dla hybrydowych systemów profili PVC-U/kompozyt oraz wykazuje, że dobór parametrów musi integrować kryteria wytrzymałościowe ze wskaźnikami bezpieczeństwa odnoszącymi się do stanu materiału. Warunki, które mogą wydawać się akceptowalne przy ocenie prowadzonej wyłącznie na podstawie obciążenia niszczącego, mogą mimo to inicjować procesy degradacyjne pozostające poza rozdzielczością tej pojedynczej miary.