

**IV**  
**PROBLEMY EKSPLOATACYJNE**  
**POŁĄCZEŃ MONTAŻOWYCH**



Marek ROŚKOWICZ

Sławomir TKACZUK

Wojskowa Akademia Techniczna

Warszawa, Polska

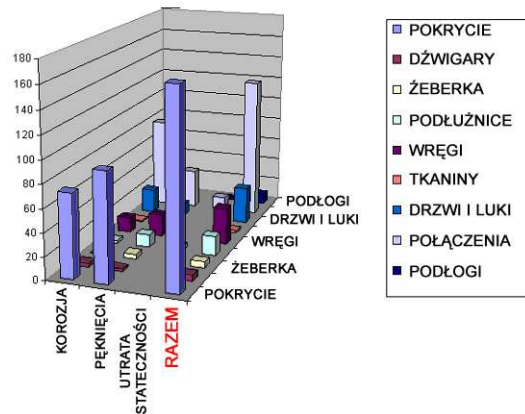
## POŁĄCZENIA ADHEZYJNE W NAPRAWACH POKRYĆ PŁATOWCÓW

## WSTĘP

Statki powietrzne to złożone obiekty techniczne, które składają się z wielu elementów – zespołów i układów konstrukcyjnych, które to w różnym stopniu narażone są na uszkodzenia. Uszkodzenie jest zazwyczaj skutkiem nienormalnego oddziaływania na konstrukcję (skutkiem pracy w warunkach, do których nie jest ona przystosowana), niewłaściwą eksploatacją, ewentualnie błędem konstrukcyjnym, wadą materiałową, niedotrzymaniem warunków technologii produkcji lub nadmiernego zużycia. W przypadku wojskowych statków powietrznych dochodzą też oczywiście uszkodzenia spowodowane oddziaływaniem środków bojowych [1, 2].

Największa względna częstotliwość uszkodzeń przypada na pokrycie płatowca (98...100 %), pokładową sieć elektryczną (60...70 %) oraz przewody instalacji hydraulicznych i pneumatycznych. Uszkodzenia, w zależności od przyczyny, mogą mieć charakter uszkodzenia pojedynczego elementu lub uszkodzenia kompleksowego, to znaczy że obok uszkodzeń pokrycia występują zazwyczaj uszkodzenia: bloków, agregatów, instalacji, elementów siłowych itp. [1, 3]. Nie wszystkie elementy płatowca statku powietrznego są narażone w tym samym stopniu. Okazuje się, że stosunkowo mało podatne na uszkodzenia są dźwigary, w większym stopniu podłużnice, wręgi i żebra, najczęściej zaś uszkodzane jest pokrycie, w tym panele pokryw integralnych (rys. 1) [4].

W związku z tym, że większość z uszkodzeń powstających w warunkach eksploatacji nie powoduje katastrofy samolotu czy śmigłowca to może być usunięta w wyniku wykonania naprawy w warunkach polowych (lotnictwo wojskowe) lub warunkach bazy naprawczej (lotnictwo cywilne).



Rys. 1. Względna częstość występowania różnego rodzaju uszkodzeń w określonych częściach struktury płatowca

Skutecznym sposobem napraw uszkodzonych elementów konstrukcyjnych statków powietrznych, są naprawy wykonywane z wykorzystaniem nowoczesnych materiałów kompozytowych opartych na włóknach szklanych, węglowych i aramidowych spajanych z uszkodzoną strukturą tworzywami adhezyjnymi. Naprawy realizowane z wykorzystaniem materiałów kompozytowych są szczególnie akceptowane w przypadku pokryć wykonanych ze stopów aluminium [5, 6].

Dość istotnym problemem pozostaje zawsze etap podejmowania decyzji o rozpoczęciu naprawy. Nie ma uniwersalnych wytycznych, na podstawie których można przystąpić do realizacji naprawy. Poszczególni producenci statków powietrznych tworzą własne programy naprawcze dla konkretnych produktów, gdzie zakres i technologia wykonywania tego rodzaju napraw są prezentowane bez podawania szczegółowych kryteriów naprawczych (które to pozostają swoistą tajemnicą firmy). Dokumenty powstają w oparciu o programy badawcze realizowane przez laboratoria producentów lotniczych i eksploatacyjne doświadczenia przekazywane przez przewoźników obsługujących statki powietrze z naprawianymi elementami.

Doświadczenia niektórych firm zajmujących się naprawą konstrukcji lotniczych wskazują na ogólną zasadę projektowania i wykonywania naprawy uszkodzonej struktury- zredukowania dopuszczalnego współczynnika bezpieczeństwa uszkodzonego elementu do poziomu nie niższego niż 1.2 [6]. Ocenę zmiany współczynnika bezpieczeństwa w uszkodzonej strukturze można obecnie wykonać wykorzystując nowoczesne programy do obliczeń numerycznych (wykonujących obliczenia inżynierskie w oparciu o metodę elementów skończonych). W pracy wykonano analizę wpływu uszkodzenia pokrycia na wytrzymałość struktury półskorupowej statecznika poziomego samolotu TS-8 Bies.

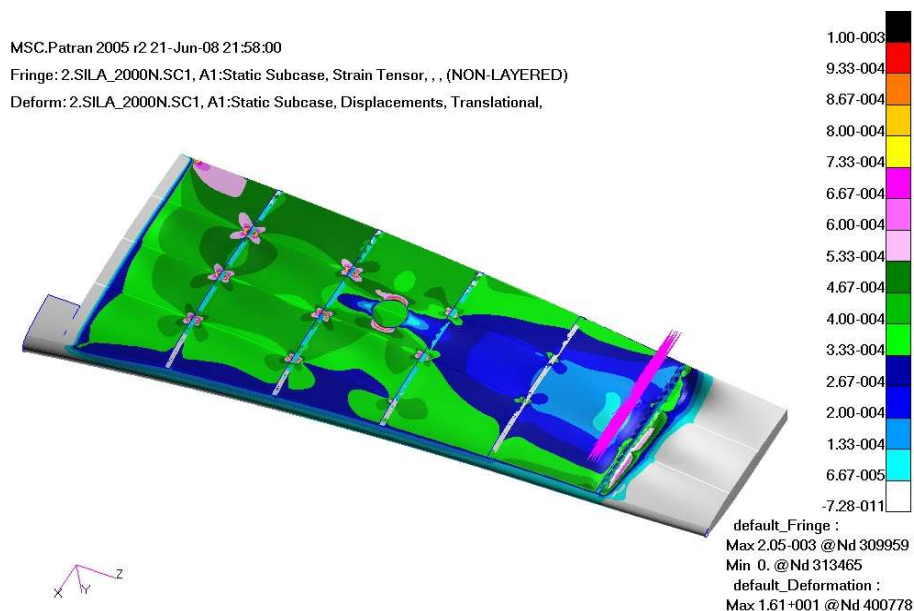
### ANALIZA USZKODZENIA STRUKTURY PÓLSKORUPOWEJ

Obliczenia numeryczne wykonano wykorzystując metodę elementów skończonych (MES), która jest stosowana w środowisku programowym MSC Patran/Nastran. Analizie wytrzymałościowej poddano statecznik poziomy samolotu TS-8 Bies o konstrukcji półskorupowej, w którym wyróżniamy: pokrycie, podłużnice, żebra oraz dźwigary: przedni i tylny. Na podstawie statecznika zdemontowanego z samolotu wykonano jego model geometryczny, starając się odwzorować jego poszczególne elementy składowe i strukturę minimalizując uproszczenia konstrukcyjne. Następnie, na bazie modelu geometrycznego, wykonano model numeryczny składający się z elementów typu SHELL (pokrycie, żebra, ścianki dźwigarów) oraz BAR (podłużnice, pasy dźwigarów). W opracowanym modelu numerycznym warunki brzegowe odpowiadały sposobowi zamocowania statecznika na stanowisku badawczym oraz sposobowi zadawania obciążeń zewnętrznych. Dla wszystkich elementów modelu przyjęto jednakowe właściwości materiałowe- stopu aluminium serii 2024T4. Model statecznika został utwierdzony z jednej strony w węzłach na całym jego obwodzie oraz na długości pięciu kolejnych rzędów węzłów. Utwierdzenie polegało na odebraniu węzłom wszystkich stopni swobody – rys. 2.



Rys. 2. Model geometryczny statecznika poziomego

W badaniu przyjęto, że siła zewnętrzna obciążająca statecznik będzie miała wartość równą 2000 [N]. Wartość siły obciążającej została wyznaczona z zależności analitycznych opisujących wartość obciążeń niszczących konstrukcję półskorupową [7]. Obciążenie zostało zamodelowane z wykorzystaniem elementu typu RBE 3 (element specjalny o nieskończonej sztywności). Siła zewnętrzna do modelu została przyłożona przez węzeł niezależny elementu – węzeł mocowania siłownika. Węzły zależne, które przenoszą obciążenie od węzła niezależnego są rozłożone na całej szerokości usterzenia na czterech rzędach elementów skończonych pokrycia.



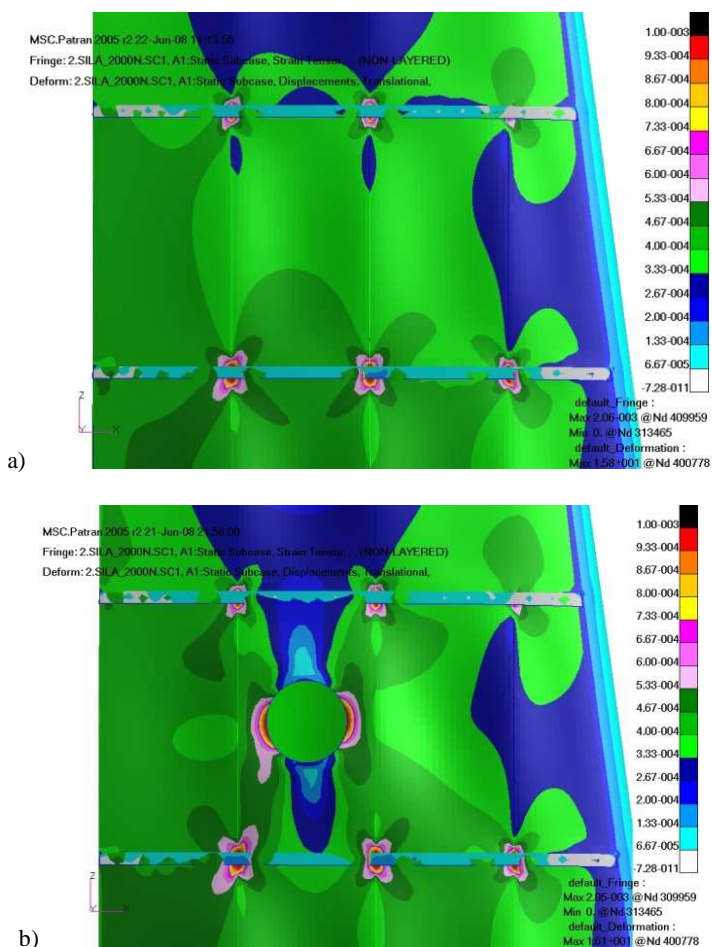
Rys. 3. Rozkład odkształceń w stateczniku poziomym z uszkodzeniem

Analizowano zmianę rozkładu naprężeń i odkształceń w stateczniku nieuszkodzonym i uszkodzonym. Uszkodzenie zostało zamodelowane otworem  $\varnothing 100$  mm w środkowej części pokrycia statecznika (rys. 3). Porównanie rozkładu naprężeń zredukowanych w strefie uszkodzenia statecznika nieuszkodzonego i uszkodzonego przedstawiono na rys. 4.

W okolicy uszkodzenia obserwowano zjawisko spiętrzenia naprężeń – ponad dwukrotny wzrost naprężeń w kierunku równoległym do żebra usterzenia oraz spadek naprężeń w kierunku równoległym do podłużnic. Tego rodzaju zmiany w pokryciu są charakterystyczne dla lokalnej utraty stateczności pokrycia (w strefie pomiędzy podłużnicą i żebrą usterzenia). Na podstawie otrzymanych wyników z obliczeń numerycznych można sformułować wniosek, że o ile uszkodzenie zmienia rozkład odkształceń w strefie uszkodzenia to są to zmiany ograniczone, w przypadku cienkościennej konstrukcji półskorupowej, do obszaru pokrycia wyznaczonego przez żebra i podłużnice.

Poza tymi elementami wzmacniającymi obserwowane odkształcenia zmieniają się w znikomym stopniu. Uszkodzenie powoduje, że elementy usztywniające tzn. żebra i podłużnice przenoszą większy wydatek obciążenia – są bardziej wyężone.

W związku z powyższym dokonując naprawy pokrycia półskorupowej konstrukcji cienkościennej, która nie obejmuje elementów usztywniających, a jedynie samo pokrycie główne kryterium naprawczym jest odtworzenie sztywności pokrycia w miejscu uszkodzenia oraz problem zachowania stateczności naprawianego elementu.



Rys. 4. Porównanie rozkładu odkształceń w stateczniku poziomym:

a) bez uszkodzenia, b) z uszkodzeniem

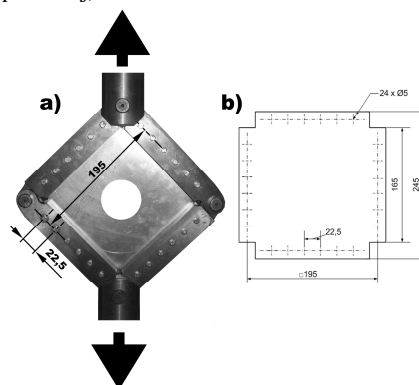
#### ZAGADNIENIE UTRATY STATECZNOŚCI NAPRAWIANEGO POKRYCIA

W konstrukcjach lotniczych, gdzie ze względu na określoną wartość współczynnika bezpieczeństwa (1,5...1,7) dozwolona jest lokalna utrata stateczności pokrycia już przy obciążeniach dopuszczalnych występujących w locie, istnieje niebezpieczeństwo, że w przypadku uszkodzonego pokrycia odkształcenia obciążonej konstrukcji spowodują od razu ogólną utratę stateczności konstrukcji (wyboczeniu ulegnie nie tylko pokrycie ale również elementy szkieletu) bez fazy początkowej tj. lokalnej utraty stateczności. Stąd istnieje konieczność naprawy nawet najmniejszych uszkodzeń pokrycia. Istnieje również potrzeba oceny efektywności wykonywanych napraw na uszkodzonym pokryciu.

W celu oceny efektywności naprawy pokrycia wykonanej z wykorzystaniem materiałów kompozytowych przeprowadzono badania eksperymentalne na próbkach modelowych. Do badań

wykorzystano przegubową ramkę, w której za pomocą śrub mocowano próbki płytowe o kształcie prezentowanym na rys. 5. Badaniom eksperymentalnym poddano próbki wykonane w postaci płyt z duralowej blachy 2024T4. Do badań wytypowano blachy o grubości 1mm. Ramka zapewniała sztywne podparcie krawędzi badanych próbek wzdłuż boków, tworzących kwadrat o wymiarach 195x195 mm. Badane fragmenty blach mocowano do przegubowej ramki za pomocą śrub średnicy 5 mm, rozstawionych równomiernie wzdłuż krawędzi ramki z zachowaniem stałej podziałki rozstawu 22,5 mm.

Ramkę obciążano siłami zgodnie ze schematem ilustrowanym na rys. 4a. W badaniach wyznaczano zmianę wartości obciążenia płyty w funkcji jej odkształcenia oraz nośność płyty. Badaniom poddano płyty nieuszkodzone, płyty uszkodzone i płyty naprawiane. Uszkodzenie płyty miało postać otworu o średnicy 60 mm wykonanego centralnie w płycie (geometria wykonanego uszkodzenia wynikała z geometrii ramki oraz geometrii wykonanej nakładki naprawczej).



Rys. 4. Widok ramki wykorzystywanej w badaniach eksperymentalnych (a) oraz kształt i wymiary próbek płytowych przygotowanych do badań (b).

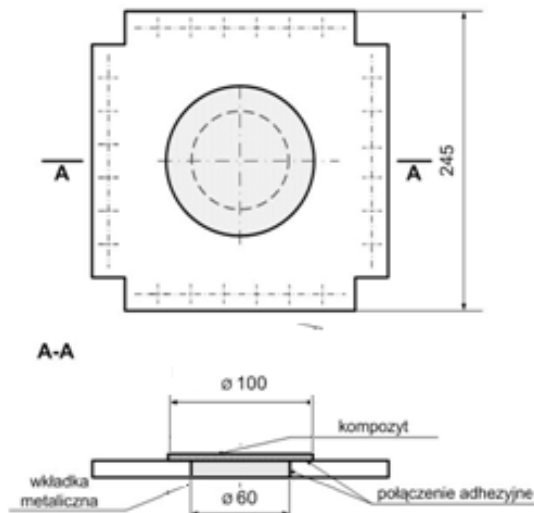
Naprawę uszkodzonych próbek zrealizowano poprzez wprowadzanie do otworu wkładki metalowej (wykonanej z tego samego materiału co badane próbki) i następnie metodą ręcznego nalaminowania kolejnych warstw tkaniny z włókien węglowych lub szklanych tworzących na zewnętrznej powierzchni płyty kompozytową nakładkę wzmacniającą. Przygotowano próbki z nakładką wzmacniającą formowaną na jednej powierzchni płyty ze względu na ograniczony dostęp do naprawianego pokrycia na płatowcu. Do przesycania tkaniny szklanej i węglowej wykorzystano kompozycję opartą na żywicy epoksydowej Epidian 53 utwardzanej trietylenotetraaminą (TECZA). Próbkę utwardzano pod naciskiem  $6,5 \text{ N/cm}^2$  przez 12 godzin w temperaturze otoczenia i następnie w temperaturze  $80^\circ\text{C}$  w czasie pięciu godzin (rys. 6).

Kompozytowe nakładki wzmacniające formowano w kształcie okrągłych łat o średnicy 100mm (w ten sposób pomiędzy krawędziami otworu i nakładki wzmacniającej kształtowano zakładkę o długości 20 mm). Do wykonania nakładek wzmacniających wykorzystano tkaniny o splocie prostym, w tym tkaninę szklaną belgijskiej firmy Syncoglass o gramaturze  $160\text{g/m}^2$  oraz tkaninę węglową firmy KDL również o gramaturze  $160\text{g/m}^2$ .

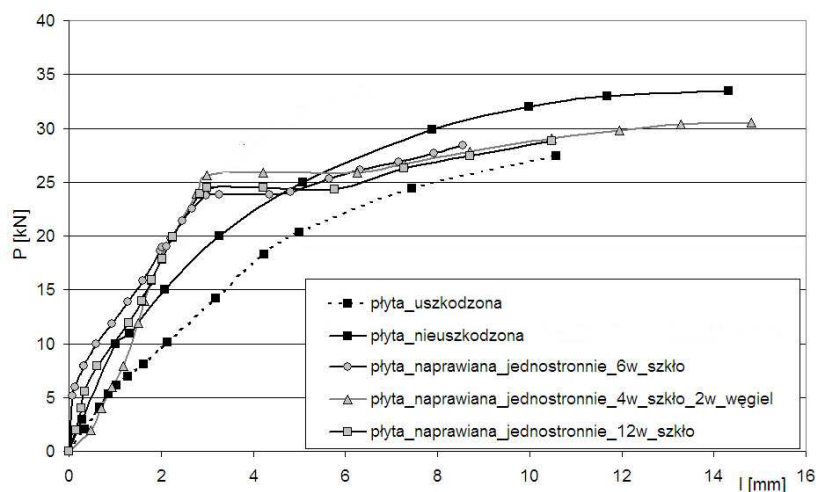
Po przygotowaniu próbki mocowano w ramce przyrządu i następnie zakładano ramkę z próbką w uchwytach maszyny wytrzymałościowej ZD-10, poddawano ją rozciąganiu z prędkością 15 mm/min. Dla każdej próbki rejestrowano przebieg zależności zmiany siły w funkcji przyrostu wydłużenia ramki ( $P = f(\Delta l)$ ). Wykonano badania dla próbek, w których modyfikowano grubość nakładki wzmacniającej (poprzez zmianę ilości warstw w laminacie) oraz rodzaj tkaniny w poszczególnych warstwach laminatu (węglowe, szklane lub naprzemiennie szklane i węglowe) w postaci kompozytu 6-cio i 12-sto warstwowego szklanego i szklano-węglowego.

Przy badaniu płyty nieuszkodzonej (bez otworu) i uszkodzonej (z otworem) oraz płyt naprawianych materiałami kompozytowymi za nośność przyjmowano wartość siły niszczącej płytę lub wartość siły, przy

której uszkodzeniu ulegało połączenie adhezyjne lub materiał kompozytowy. W trakcie wyznaczania zależności odkształcenia płyty od wartości obciążenia, obserwowano również moment utraty stateczności płyty, który objawił się spadkiem wartości obciążenia przy jednoczesnym wzroście odkształcenia. Obciążenie, przy którym następowało charakterystyczne załamanie krzywej przyjmowano jako obciążenie krytyczne. Po przekroczeniu obciążenia krytycznego płyta ulegała pofalowaniu i spadała jej sztywność w kierunku prostopadłym do płaszczyzny środkowej. Wyniki badań przedstawiono na rys. 6.



Rys. 5. Schemat wykonania naprawy uszkodzonej płyty za pomocą wkładki metalowej i nakładki kompozytowej



Rys. 6. Charakterystyki obciążenia ( $P = f(\Delta l)$ ) płyt poddanych ścinaniu, wykonanych z duralowej blachy 2024T4 o grubości 1 mm z zastosowaniem różnych metod naprawy



Dla wszystkich zastosowanych metod naprawy wartość obciążenia, przy którym nastąpiła gwałtowna zmiana charakteru krzywej była porównywalna i wynosiła ok. 25kN. Po przekroczeniu tej wartości obciążenia, próbki ulegały odkształceniu (charakterystyczny 'uskok' na krzywej), niezależnie od rodzaju nakładki wzmacniającej. Moment gwałtownej zmiany przebiegu krzywej związany był z niszczeniem połączenia adhezyjnego między metaliczną wkładką, a kompozytową nakładką i dynamicznym wypchnięciem metalicznej wkładki z otworu. Jednocześnie uszkodzeniu ulegało również połączenie adhezyjne pomiędzy kompozytową nakładką, a płytą.

### WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że:

- w strukturze półskorupowej uszkodzenie samego pokrycia wywołuje lokalną zmianę (wzrost odkształceń w strefie uszkodzenia ograniczonej żebrami i podłużnicami,
- projektując naprawę pokrycia struktury półskorupowej należy przyjmować jako kryterium naprawcze ograniczenia związane ze zjawiskiem lokalnego wyboczenia pokrycia,
- w badaniach eksperymentalnych naprawianych płyt (gdzie wykorzystywano jednostronną kompozytową nakładkę wzmacniającą) nie uzyskano wartości siły krytycznej odpowiadających płycie nieuszkodzonej,
- wszystkie naprawiane płyty, w zakresie obciążeń o wartości mniejszej od siły krytycznej wyznaczonej dla płyty nieuszkodzonej, charakteryzują się wyższą od niej sztywnością początkową.
- naprawiane płyty - niezależnie od struktury nakładek wzmacniających (kompozyt szklany, szklano-węglowy) charakteryzuje porównywalna wartość siły krytycznej,

### LITERATURA

1. Godzimirski J.: Naprawa płatowców. WAW, Warszawa 1998.
2. Lewitowicz J.: Podstawy eksploatacji statków powietrznych cz.4. Wydawnictwo ITWL Warszawa 2007.
3. Bieżący i średni remont sprzętu lotniczego. DWL Poznań 1990.
4. Jones A., Peel C.J.: The analysis of aircraft component failures. In: Goel V.S., editor. Analysing failures: the problems and the solutions. Cleveland, OH: American Society for Metals, 1986.
5. Baker A. Chester R. Davis M. Roberts J. Retchord J.: Reinforcement of the F-111 wing pivot fitting with a baron/epoxy doubler system- materials engineering aspects. Composites 1993.
6. Baker P. Chalkley.: Development of a generic repair joint for certification of bonded composite repairs. International Journal of Adhesion and Adhesives 19 p. 1999
7. Cichosz E.: Obciążenia zewnętrzne samolotu. Wydawnictwo WAT, Warszawa 1968.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt badawczy O N504 0010 33

### ADHESIVE CONNECTION WITH REPAIRS TO SKIN OF AIRFRAMES

**Abstract.** The article presents the issues related to the repair skin semi-monocoque structures. Presentation of loss-sented an analysis of the methods of repair using adhesive's materials.

**Wiktoria MNACAKANIAN****Porfirij BOJKO**

Uniwersytet Górniczy

Moskwa, Rosja

**REGENERACJA WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNYCH MIMOŚRODOWYCH POŁĄCZEŃ  
W TULEJACH AGREGATÓW ROZDRABIAJĄCYCH****ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СОЕДИНЕНИЙ  
ЭКСЦЕНТРИКОВЫХ СТАКАНОВ ДРОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ**

Эксцентрики и сферические подшипники являются наиболее нагруженными узлами дробилок крупного, мелкого и среднего дробления. Материал эксцентриков и подшипниковых опор – сталь 30Л. Для обеспечения требуемых условий эксплуатации рабочие поверхности эксцентрика и сферического подшипника в базовом варианте заливают баббитом марок Б83 или Б16.

С целью экономии антифрикционного материала, применяемого для заливки поверхностей скольжения втулок эксцентрика дробилок и сферического подшипника, снижения трудоемкости и повышения качества восстановительных работ, а также для повышения работоспособности реставрируемых деталей, более целесообразным является применение газотермических методов напыления для восстановления размеров и геометрических форм последних.

Необходимость замены технологии заливки баббитового слоя подшипников скольжения на более рациональную технологию нанесения покрытия из соответствующего материала обусловлена низкой работоспособностью и интенсивным износом поверхности скольжения вследствие некачественной заливки баббита.

Опыт применения электродуговой наплавки порошковой проволоки из оловянной бронзы ППБрОС8-21 для восстановления антифрикционного слоя втулок эксцентрика показал, что работоспособность втулок значительно повысилась [1]. Для повышения качества наплавки применяют флюсы, обеспечивающие стабильность горения дуги, получение заданного химического состава и качества наплавляемого слоя. В качестве флюсов используют марки АН-348А, АН-348АМ. Скорость наплавки составляет 16...35 м/час, величина подачи (шаг наплавки) 4...6 мм/об. Однако, производственная практика показывает, что втулки, наплавленные бронзой, для повторного использования непригодны, так как при использовании технологии электродуговой наплавки отсутствует возможность регенерации детали. Это связано, в первую очередь, со значительным тепловым эффектом, возникающим при наплавке, в результате которого структура и свойства материала поверхности основы претерпевают необратимые изменения.

В связи с этим наиболее эффективным методом восстановления работоспособности втулок эксцентрика и сферического подшипника является газотермическое напыление антифрикционного материала. Важной особенностью данного метода является возможность многократного его применения для одной и той же детали в случае полной выработки нанесенного покрытия.

Внутренние и наружные поверхности эксцентрикового стакана и рабочую поверхность сферической опоры восстанавливают путем газопламенного напыления баббитового покрытия. Данная ремонтная технология применяется взамен первоначальной заливки баббитового слоя.

Сущность газопламенного напыления порошкового материала заключается в том, что напыляемый порошок, подаваемый через центральное отверстие горелки, расплавляется пламенем горючего газа. Расплавленные частицы наплавляемого металла подхватываются струей сжатого воздуха и транспортируются на восстанавливаемую поверхность. Давление сжатого воздуха

(транспортирующего газа) составляет 0,6 - 0,8 МПа. Дистанция напыления, определяющая расстояние от сопла горелки до напыляемой поверхности, составляет 150 - 170 мм. В качестве горючего газа используют смесь ацетилена с кислородом, который также подается под давлением 0,8 МПа. Напыляемый материал подается в виде порошка из накопителя по специальным каналам. Состав напыляемого материала идентичен баббитам, применяемым при заливке, в частности, Б16 и Б83. Перед нанесением покрытия, согласно разработанной технологии, выполняется предварительная подготовка поверхностей восстанавливаемых деталей: механическая обработка, обезжиривание и нанесение подслоя.

Восстанавливаемые поверхности эксцентрикового стакана обрабатываются на специальном технологическом модуле, который позволяет получить на цилиндрической части кольцевые канавки или поверхность типа «рваная резьба», а после нанесения покрытия выполнить отделочную обработку. Для сферической опоры такая подготовка может осуществляться на крупном токарно-карусельном станке при условии демонтажа многотонной опоры. В этом случае по программе задаваемой устройством ЧПУ станка, осуществляется точение по всей рабочей поверхности сферического подшипника.

Непосредственно перед нанесением покрытия выполняют обезжиривание восстанавливаемых поверхностей с помощью уайт-спирита или тетрахлорэтилена. Затем на подготовленную базу напыляют газопламенным методом баббитовое покрытие толщиной до 12...15 мм. Нанесение баббитового покрытия происходит в автоматическом режиме с использованием встраиваемого на станок манипулятора, на котором монтируется горелка с подводом горючего и транспортирующего газов и напыляемого порошкового материала.

Ввиду различия физико-механических свойств материала основы и напыляемого слоя газопламенное напыление баббита осуществляется через подслой композиционного термореагирующего никель-алюминиевого порошка марки ПТ-НА-01. Предварительное нанесение подслоя обеспечивает достаточно прочное сцепление покрытия с материалом основы в пределах 25 – 30 МПа. При восстановлении сферического подшипника скорость вращения чаши составляет порядка 10 – 14 м/мин и поддерживается постоянной за счет изменения частоты вращения планшайбы. Смещение горелки происходит в радиальном направлении. Величина радиальной подачи горелки составляет 2- 4 мм/об и может изменяться в зависимости от технологических параметров процесса напыления и требуемой толщины покрытия. При необходимости выполняют восстановление локального участка изношенной поверхности сферической опоры.

После нанесения покрытия для достижения требуемых показателей качества отремонтированных поверхностей выполняют отделочную механическую лезвийную обработку баббитового слоя. Опыт эксплуатации эксцентриковых стаканов и сферических опор дробильно-измельчительного оборудования показал, что применение баббитового слоя, полученного напылением, обеспечивает более высокие эксплуатационные свойства подшипниковых опор по сравнению с первоначальной технологией получения антифрикционного слоя заливкой. Кроме того, технология создания газотермического покрытия на поверхности эксцентрикового стакана позволяет уменьшить толщину баббитового слоя до 5-6 мм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Донченко А.С., Донченко В.А. Справочник механика рудо-обогажительной фабрики. М.: Недра, 1975, 556 с.

#### RESTORATION OF OPERATIONAL PROPERTIES OF CONNECTIONS ECCENTRIC GLASSES OF CRUSHING UNITS

**Abstract.** In the article the progressive technology of restoration of serviceability of the loaded connections eccentric glasses of crushing units is considered.

**Andrzej KOMOREK****Paweł PRZYBYŁEK**

Wyższa Szkoła Sił Powietrznych

Dęblin, Polska

### **OBUDOWY OCHRONNE WYPOSAŻENIA AWIONICZNEGO Z POWŁOKAMI NA BAZIE KOMPOZYTÓW O WŁAŚCIWOŚCIACH ABLACYJNYCH**

Na pokładach statków powietrznych zabudowane są urządzenia, instalacje i przyrządy zapewniające załódze właściwe warunki, umożliwiające kontrolę pracy zespołów i urządzeń oraz ułatwiające pilotowanie i nawigowanie statkiem powietrznym. Wyposażenie nowych oraz modernizacja awioniki użytkowanych samolotów i śmigłowców objawia przed konstruktorami nowe problemy, których rozwiązanie jest konieczne w celu spełnienia coraz surowszych warunków dotyczących zapewnienia bezpieczeństwa lotu, niezawodności, trwałości, itp. Ponadto pojawiają się całkowicie nowe obszary wymagań, zmuszających konstruktorów i producentów do poszukiwań innowacyjnych rozwiązań i weryfikacji dotychczas stosowanych. Użytkowane urządzenia elektryczne i elektroniczne emitują znaczne ilości ciepła a jednocześnie są narażone na działanie ciepła wydzielanego, przez inne urządzenia. Stosowane obecnie technologie chłodzenia (standardowe radiatory i wentylatory) zbliżają się do granic swoich możliwości. W takiej sytuacji zwiększanie funkcjonalności produktów jest coraz częściej uzależnione od odpowiedniego zarządzania ciepłem. Ponadto większość urządzeń awioniki samolotów i śmigłowców zbudowanych na bazie elementów wysokowydajnej elektroniki chroniona jest przed uszkodzeniami przez obudowy wykonane z materiałów o dużym współczynniku przewodności cieplnej, spośród których najpowszechniej stosowanymi były metale, np. stopy aluminium.

W celu ograniczenia wpływu temperatury na poprawność funkcjonowania szczególnie ważnych urządzeń awionicznych zabudowanych na pokładzie statku powietrznego w sytuacjach awaryjnych oraz przedłużenia czasu ich działania w tych stanach, zainicjowano badania zmierzające do zbudowania obudowy ochronnej zapewniającej optymalne warunki pracy wybranych urządzeń. W konstrukcji obudowy postanowiono wykorzystać kompozyty o właściwościach ablacyjnych.

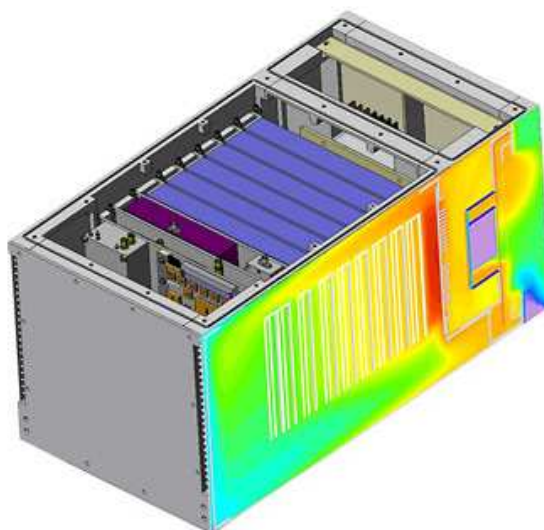
### **WARUNKI PRACY POZAKABINOWEGO WYPOSAŻENIA AWIONICZNEGO STATKÓW POWIETRZNYCH**

Urządzenia elektroniczne stanowiące wyposażenie statków powietrznych są eksploatowane w różnorodnych warunkach wynikających z zmiany parametrów lotu oraz właściwości fizycznych otoczenia. Przyjmuje się iż np. temperatura otoczenia zmienia się w zakresie od  $(-60...+50)^{\circ}\text{C}$ . Jednakże skalowanie przyrządów pokładowych przeprowadza się w temperaturze normalnej  $(15...20)^{\circ}\text{C}$ . Zmiana temperatury otoczenia w tak szerokim zakresie może wywierać wpływ na:

- wymiary liniowe, tj. zmiany przełożenia, zwiększenie lub zmniejszenie szczelin itp.;
- zmianę sprężystości elementów pomiarowych;
- zmianę rezystancji przewodników elektrycznych;
- stan smarowania współpracujących elementów;
- stan mas plastycznych i materiałów izolacyjnych;
- skraplanie się pary wodnej na częściach przyrządów przy szybkiej zmianie temperatury otoczenia [3].

W celu znormalizowania warunków pracy które należy uwzględnić przy ich projektowaniu oraz wytwarzaniu, poszczególne organizacje odpowiedzialne za eksploatację sprzętu lotniczego sformułowały szereg norm określających wymagania dotyczące poprawnego funkcjonowania wyposażenia pokładowego. Wyposażenie pokładowe wojskowych statków powietrznych eksploatowanych w krajach NATO musi spełniać wymagania normy środowiskowej MIL-STD-810. Norma określa m.in.: wartość i szybkość zmian temperatury oraz ciśnienia w jakich wyposażenie lotnicze powinno działać bezawaryjnie i wiarygodnie.

Odrębne zagadnienie stanowi kontrola energii cieplnej, wytwarzanej przez urządzenia elektryczne i elektroniczne podczas ich pracy. Okazuje się, że problem ten należy rozważać zarówno w aspekcie ochrony urządzeń przed wytworzonym przez nie ciepłem jak również w aspekcie izolacji tych urządzeń od otoczenia, tak aby energia cieplna wytwarzana przez te urządzenia nie zakłócała pracy innych urządzeń. Aby zabezpieczyć i izolować elementy elektroniczne oraz zbudowane z nich urządzenia, można wykorzystać odpowiednie obudowy, uwzględniające zarówno wymagania wytrzymałościowe, masowe oraz coraz częściej zapewniającej zarządzanie ciepłem we wnętrzu obudowy. W związku z powyższym już na etapie projektowania koniecznym staje się określenie m.in. rozkładu temperatury wewnątrz zaprojektowanej obudowy przy jednoczesnym uwzględnieniu zmiany warunków otoczenia np. na wysokości 25000 m gęstość powietrza na zewnątrz jest 8 krotnie niższa niż na poziomie morza. W takich warunkach wydajność systemu chłodzenia powietrznego powinna być 8 krotnie większa. Należy również uwzględnić parametry pracy urządzenia np. im wyższa szybkość przetwarzania danych tym większa ilość wydzielanej energii cieplnej.



Rys. 1. Model obciążenia termicznego bloku elektronicznego projektowanego dla samolotów ATR stworzony przy wykorzystaniu oprogramowania "FloTHERM" firmy Hybricon Inc.

#### **METODY ZABEZPIECZENIA TERMICZNEGO WYPOSAŻENIA STATKÓW POWIETRZNYCH**

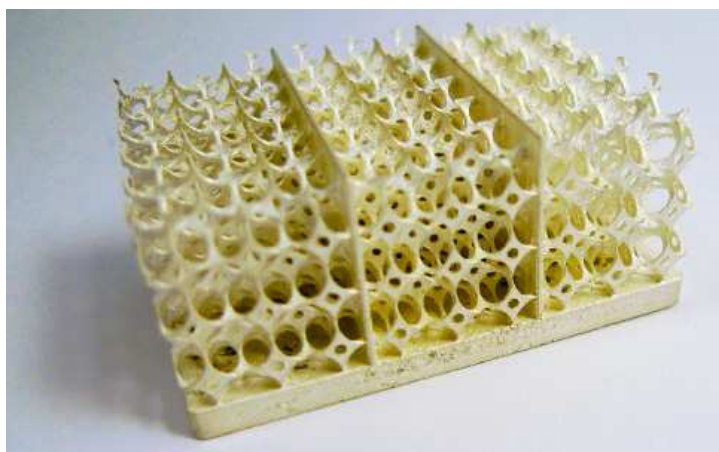
W celu zapewnienia poprawnego funkcjonowania urządzeń elektronicznych, koniecznym stało się stosowanie rozwiązań, ograniczających wpływ temperatury na ich pracę. Stosuje się m.in. układy wykorzystujące:

- radiatory,
- chłodzenia za pomocą swobodnego przepływu powietrza atmosferycznego;

- chłodzenia za pomocą wymuszonego przepływu powietrza atmosferycznego;
- chłodzenia za pomocą wymuszonego przepływu powietrza o regulowanej temperaturze;
- chłodzenia za pomocą wymuszonego przepływu cieczy;
- odpowiednio skonstruowane obudowy;
- bariery, osłony i przegrody ochronnych;
- obudowy z udziałem materiału ablacyjnego.

#### ***Chłodzenie z zastosowaniem radiatorów***

W chłodzeniu urządzeń elektronicznych powszechnie stosowane są radiatory o równoległych żeberkach, które niestety osiągnęły już granice swoich możliwości. Pojawiają się nowe rozwiązania np. radiator żeberkowo-komórkowy (Fin-Foam Heat Sink - FFHS) opracowany przez Alcatel-Lucent Bell Labs, który rozprasza dwa razy więcej ciepła niż standardowy radiator o równoległych żeberkach przy tej samej szybkości przepływu powietrza. Jednakże nie znalazły one szerszego zastosowania w lotnictwie.



Rys. 2. Radiator żeberkowo-komórkowy

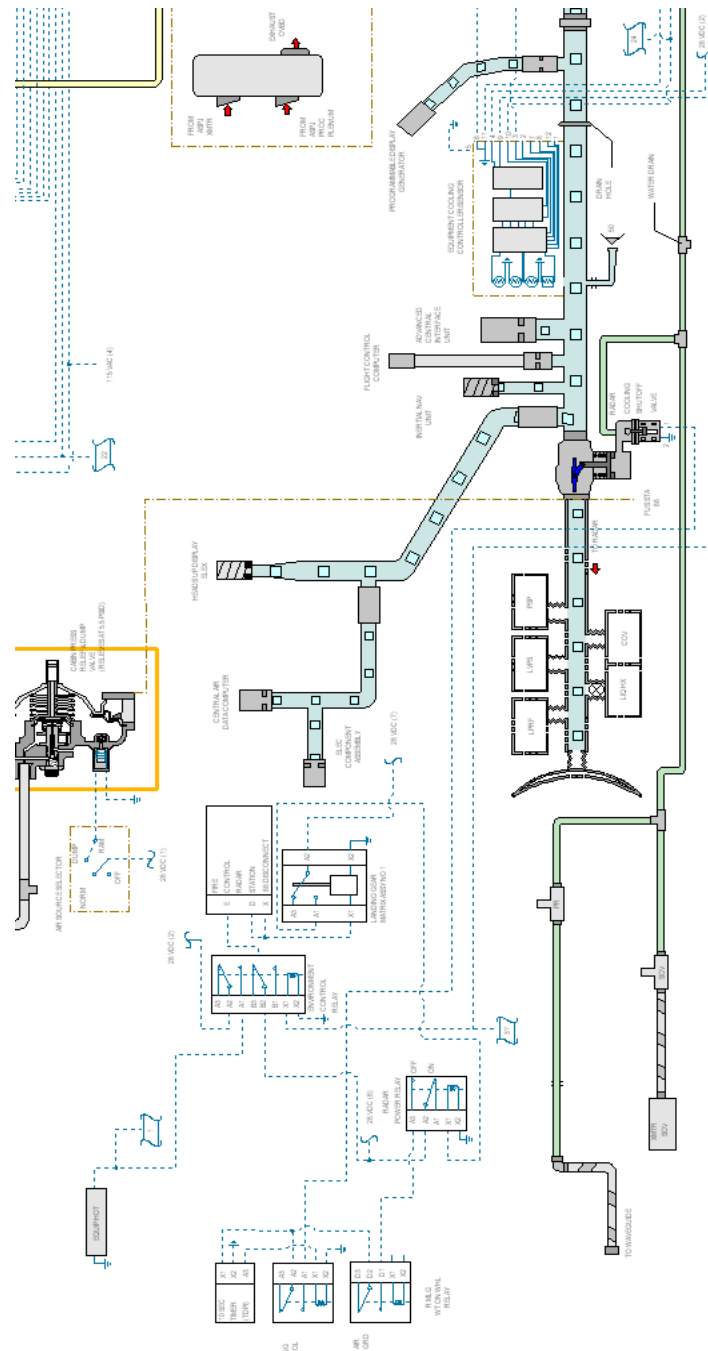
#### ***Chłodzenie z wykorzystaniem układów przepływowych***

Rozwiązaniem najpowszechniej stosowanym obecnie w lotnictwie są systemy chłodzące wykorzystujące jako medium odbierające ciepło od wyposażenia:

- powietrze;
- paliwo;
- ciecz chłodzącą.

Układ wykorzystujący przepływ powietrza wykorzystywany jest np. w samolocie F-16 wyposażonym w system kontroli temperatury i ciśnienia powietrza (ECS- environmental control system), składający się z obwodów:

- zasilającego;
- dystrybucji powietrza;
- ciśnieniowania kabiny;
- chłodzenia;
- chłodzenia wyposażenia radiowo-elektronicznego.

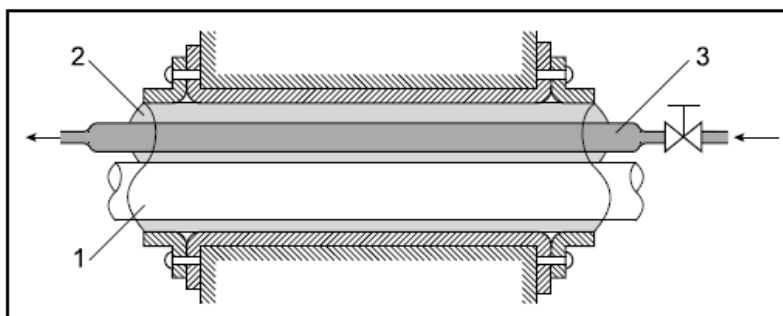


Rys. 3. Schemat systemu kontroli temperatury i ciśnienia powietrza samolotu F-16

W podobny sposób realizowane jest chłodzenie wyposażenia elektronicznego na takich samolotach jak:

- A380, wyposażonym w dwa niezależne systemy chłodzące: lewy i prawy przeznaczone do chłodzenia:
  - elementów wyposażenia pokładowego;
  - zasadniczego systemu zasilania;
  - tylnych i górnych luków wyposażenia elektronicznego.
- Boeing B767, w którego wczesnych wersjach samolotu system wymiany ciepła wykorzystywał poszycie samolotu, a w późniejszych cyrkulacja powietrza odbywa się w dolnych przedziałach samolotu.

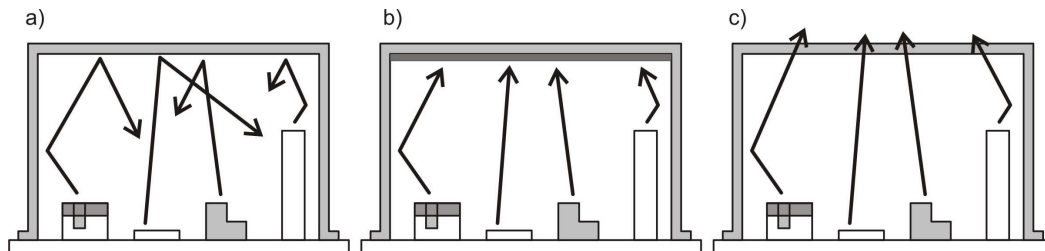
Innym rozwiązaniem zadania odbioru ciepła od elementów wyposażenia jest zastosowanie systemu chłodzenia, w którym czynnikiem roboczym jest ciecz. Do chłodzenia prądnic, w niektórych samolotach jako czynnik chłodzący stosowane jest paliwo (Su-22M4). Prądnice prądu stałego na samolocie F-22 są chłodzone cieczą dielektryczną PAO. Stosowanie chłodzenia cieczowego prądnic pozwala na uzyskanie większej mocy jednostkowej (z 1 kg masy prądnicy).



Rys. 4. Przykład rozwiązania chłodzenia kabla energetycznego przepływającym czynnikiem chłodzącym:  
1 – rdzeń, 2 – ciecz dielektryczna, 3 – przewód chłodzący

#### **Obudowy i osłony ochronne**

Rozwiązaniem, które jest stosowane do ochrony termicznej pojedynczych elementów elektronicznych są specjalne osłony z materiałów o odpowiedniej do potrzeb przewodności cieplnej (polimer wypełniony materiałem przewodzącym ciepło lub będącym izolatorem cieplnym).



Rys. 5. Schemat koncepcji obudowy ochronnej, a) obudowa odbijająca energię cieplną, b) obudowa z warstwą pochłaniającą energię cieplną, c) obudowa z materiału o dobrej przewodności cieplnej



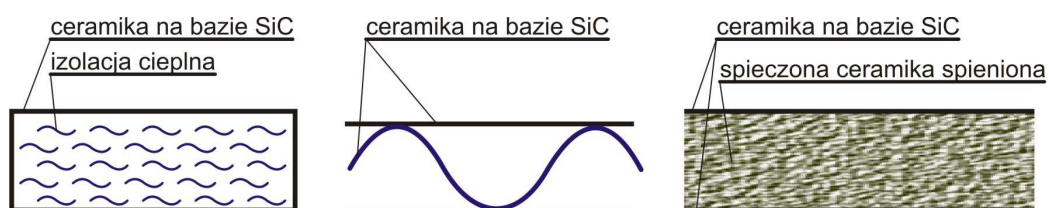
Kolejną metodą zabezpieczenia wyposażenia awionicznego statku powietrznego przed oddziaływaniem wysokiej temperatury i ognia jest stosowanie powłok, osłon i barier, chroniących wybrane elementy przed działaniem ognia w przypadku wystąpienia pożaru na pokładzie statku powietrznego, np. pokrywanie przewodów elektrycznych lub przegród (rys. 6) specjalnymi materiałami tworzącymi barierę ochronną.



Rys. 6. Przegroda ochronna śmigłowca W-3 pokryta szpachlówką ognioodporną

#### ***Materiały ablacyjne jako powłoki ochronne***

W budowie statków powietrznych od pewnego czasu wykorzystuje się specjalistyczne materiały służące do zabezpieczania różnych elementów przed wpływem wysokiej temperatury. W ostatnich latach często korzysta się z materiałów posiadających właściwości ablacyjne (chłodzenie na skutek odparowania lub odsublumowania ochronnego materiału). Zjawisko to wykorzystywano dotychczas przy budowie elementów dysz wylotowych silników rakietowych, systemu ochrony termicznej (FGM) zastosowanego w samolocie kosmicznym (program Orient-express) oraz systemu TPS (Thermal Protection System) wykorzystywanego na promach kosmicznych.



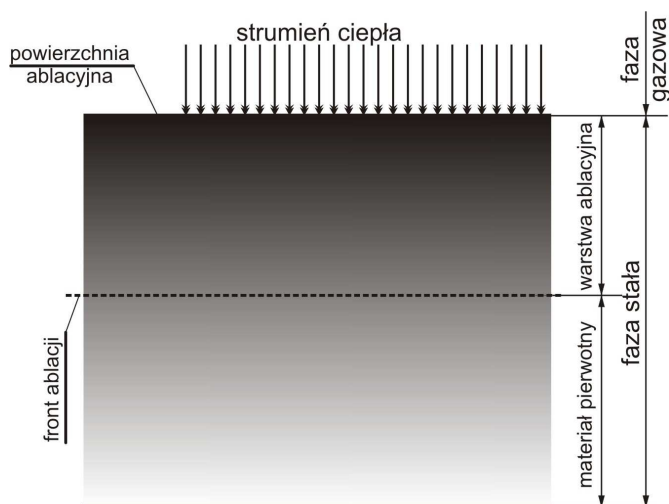
Rys. 7. Osłony cieplne czołowych powierzchni statków powietrznych do pracy w temperaturach 1250...1700 °C [7]

Ablacja jest samoregulującym się procesem wymiany ciepła i masy w wyniku którego na skutek przemian fizycznych oraz reakcji chemicznych, dochodzi do nieodwracalnych zmian strukturalnych i chemicznych materiału z równoczesnym pochłanianiem ciepła. Proces ten jest inicjowany i podtrzymywany z zewnętrznych źródeł energii cieplnej [1].

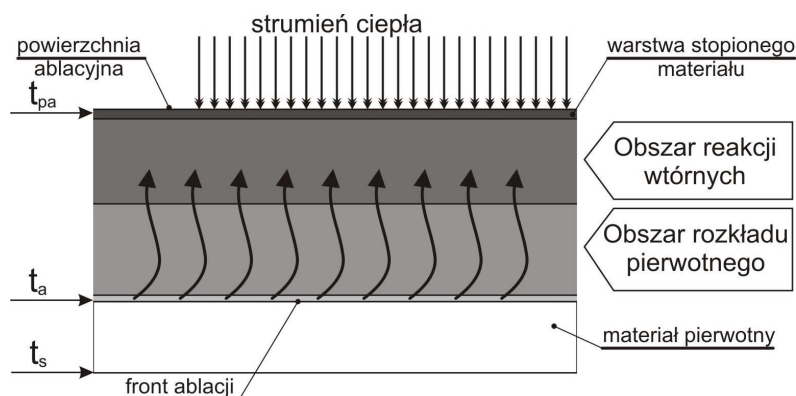
W procesie ablacji strumień energii zużywany jest na:

- depolimeryzację organicznych składników kompozytu;

- topnienie, parowanie i sublimacje łatwo topliwych napełniaczy kompozytu i produktów depolimeryzacji;
- nagrzewanie produktów odprowadzanych do otoczenia;
- endotermiczne reakcje pomiędzy składnikami kompozytu i produktami depolimeryzacji;
- konwekcyjną wymianę ciepła z otoczeniem;
- wymianę ciepła przez promieniowanie [2].



Rys. 8. Schemat fizycznego modelu ablacji [2]

Rys. 9. Schemat warstwy ablacyjnej,  $t_{pa}$  – temperatura powierzchni ablacyjnej,  $t_a$  – temperatura frontu ablacji,  $t_s$  – temperatura tylnej powierzchni ścianki [2].

W materiale ablacyjnym podczas przebiegu procesu ablacji możemy wyróżnić:

- powierzchnię ablacyjną na styku fazy gazowej i stałej;
- powierzchnię rozkładu zwaną „frontem ablacji” oddzielającą warstwę ablacyjną od materiału pierwotnego;

- warstwę ablacyjną znajdującą się w fazie stałej pomiędzy powierzchnią ablacyjną i frontem ablacji;
- warstwę materiału pierwotnego w warstwie stałej.

W warstwie ablacyjnej można wyróżnić: obszar rozkładu pierwotnego i obszar reakcji wtórnych odpowiadające zachodzącym w niej zjawiskom określenie których jest niezbędne do przeprowadzenia bilansu energetycznego.

### **ZAŁOŻENIA DO BADAŃ KONSTRUKCJI OBUDOWY OCHRONNEJ WYPOSAŻENIA AWIONICZNEGO STATKÓW POWIETRZNYCH**

Opisane metody zabezpieczają urządzenia elektroniczne przed wpływem temperatury podczas normalnej pracy i w określonym zakresie, np. na samolocie F-16, po zaświeceniu się lampki EQUIP HOT, należy natychmiast wyłączyć wyposażenie elektroniczne, chyba, że jest niezbędne do lotu (niektóre urządzenia są wyłączane automatycznie).

Taki schemat działania powoduje, że systemy tylko w ograniczony sposób zabezpieczają urządzenia elektroniczne przed działaniem temperatur powyżej określonej wartości, np. wytworzonej w wyniku pożaru na pokładzie statku powietrznego. Dodatkowo układy te działają często asekuracyjnie, powodując wcześniejsze niż to jest konieczne wyłączenie zabezpieczanego urządzenia z użytkowania a tym samym niejednokrotnie pozbawiają załogę informacji i możliwości, które w momencie wystąpienia zdarzenia lotniczego związanego np. z pożarem mogą mieć kluczowe znaczenie dla ratowania życia załogi, pasażerów, ładunku lub kontynuowania misji do czasu gdy zmiana warunków umożliwiłaby bezpieczne jej zakończenie.

W związku z powyższym zainicjowane zostały badania mające na celu stworzenie uniwersalnej obudowy ochronnej, która w sytuacji awaryjnej, polegającej na wzroście temperatury bezpośredniego otoczenia pracy urządzenia elektronicznego zapobiegłaby:

- przedwczesnemu wyłączeniu urządzenia z użytkowania;
- zniszczeniu urządzenia poprzez oddziaływanie wysokiej temperatury;
- zniszczeniu innych urządzeń elektronicznych zabudowanych w bezpośrednim sąsiedztwie w przypadku zapłonu elementów ochraniającego urządzenia.

Wobec tego, iż chronione urządzenia również emitują ciepło, wydaje się, że w badaniach należy uwzględnić zapewnienie ochrony przed autoogrzewaniem.

Do przeprowadzenia obliczeń wstępnych, założono, że obudowa będzie miała kształt kulisty, ze względów technologicznych składający się z dwóch elementów połączonych opaską.

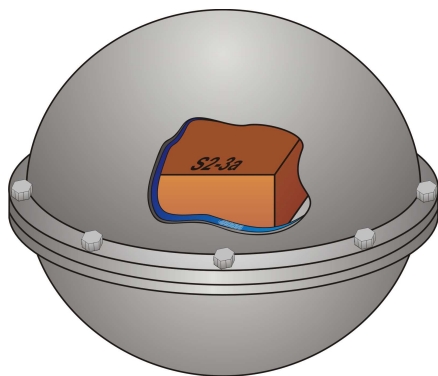
Ponadto założono wstępnie dwie koncepcje umieszczenia warstwy zabezpieczającej obudowy:

- na wewnętrznej stronie obudowy (rys. 10),
- na zewnętrznej stronie obudowy.

Jako materiał konstrukcyjny do budowy modelu badawczego zostanie wykorzystany stop aluminium, najczęściej stosowany na standardowe obudowy urządzeń wyposażenia elektronicznego statków powietrznych.

Do wytworzenia warstwy ochronnej postanowiono wykorzystać kompozyty o właściwościach ablacyjnych.

Do prawidłowego wykorzystania właściwości ablacyjnych materiału wymagana jest znajomość i uwzględnienie „ablacyjnego zużywania się materiału”, czyli procesu zmniejszania się czynnej objętości tworzywa nie podlegającego ablacji [4].



Rys. 10. Koncepcja uniwersalnej obudowy ochronnej wykorzystującej materiał ablacyjny umieszczony wewnątrz

Szybkość ablacji jest jednym z podstawowych kryteriów pozwalających na porównanie właściwości różnych materiałów, natomiast z punktu widzenia właściwości eksploatacyjnych i użytkowych najważniejszą cechą termoochronną materiału ablacyjnego jest stopień redukcji temperatury tylnej powierzchni ścianki izolującej. Szybkość ablacji zależna jest od ciepła ablacji  $H$  oraz gęstości strumienia ciepła  $q$  doprowadzonego do powierzchni ablacyjnej. Efektywne ciepło ablacji materiału  $H$  wyraża się zależnością pomiędzy gęstością strumienia ciepła i masową szybkością ablacji:

$$H = \frac{q_0}{\dot{m}} - \left( \int_{T_a}^{T_g} c_p dT + \xi [c_f + \beta (\Delta H)_0] + \frac{q_0}{q_0 - q_p} \right) \quad (1)$$

gdzie:

$\dot{m}$  - masowa szybkość ablacji [g/s]

$q_0$  - gęstość strumienia ciepła wyznaczona dla powierzchni pierwotnej (niezdegradowanej) w temperaturze ablacji [W/m<sup>2</sup>]

$q_p$  - gęstość strumienia emisji [W/m<sup>2</sup>]

$c_f$  - ciepło przemian fazowych (topienia, parowania, sublimacji) [J/kg]

$c_p$  - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu [J/kgK]

$T_a$  - temperatura bezwzględna ablacji na powierzchni materiału [K]

$\Delta H$  - przyrost entalpii gazu w warstwie granicznej [J/kg]

$\xi$  - współczynnik zagazowania produktów pirolizy

$\beta$  - współczynnik wymiany masy z powietrzem

Czas po jakim szybkość ablacji ustabilizuje się, można obliczyć z zależności:

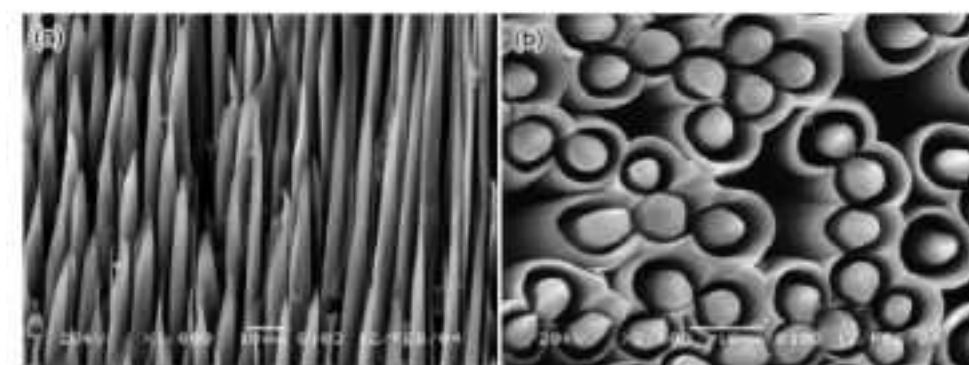
$$\tau_u = a \left( \frac{1}{v_{an}} \right)^2 \quad (2)$$

Kształtowanie ablacyjnych właściwości termochronnych polega na poszukiwaniu materiałów o dużym cieple właściwym  $c_p(t)$  i dużej gęstości  $\rho$ , oraz o niskim współczynniku przewodzenia ciepła  $\lambda(t)$  (czyli małej dyfuzyjności cieplnej). W kompozytach polimerowych po przekroczeniu temperatury ablacji (rys. 10) występują reakcje endotermiczne związane z rozkładem termicznym materiału osnowy, które powodują że efektywne ciepło właściwe  $c_p$  żywicy osiąga wysokie wartości. W czystej postaci żywice te są dobrym materiałem ablacyjnym. Jednak, ze względu na ich mięknięcie oraz porowatość i kruchość tworzącej się warstwy ablacyjnej, wymagają „zbrojenia” wysokotopliwymi napełniaczami sypkimi lub włóknistymi. Szczególnie przydatne w tym zastosowaniu są materiały wzmacniające o dużej gęstości, np. proszki lub węgliki wolframu.

Parametry ablacyjne kompozytów można poprawić poprzez zmianę rodzaju napełniaczy lub poprzez zmianę ułożenia kierunku włókien dla laminatów wzmacnianych włóknami np. dla laminatów fenolowych wzmacnianych włóknami oraz kompozytu C-C zmiana ułożenia kierunku włókien o  $90^\circ$  może spowodować spadek naprężeń termicznych o 50%.

Gęstość materiału kompozytowego jest w dużym stopniu zależna od nacisku w fazie prasowania i przekłada się na szybkość ablacji, która jest mniejsza w przypadku materiałów kompozytowych o dużej gęstości [5].

Również sposób ogrzewania powierzchni materiału ablacyjnego wywiera istotny wpływ na ubytek masy oraz powierzchnię obszaru powierzchni zdegradowanej [6].



Rys. 11. Obraz z mikroskopu skaningowego. Przekrój kompozytu ablacyjnego C-C, a) wzdłuż włókien, b) prostopadłe do włókien [6]

W związku z przedstawionymi uwarunkowaniami, mającymi znaczący wpływ na właściwości ablacyjne kompozytów, kluczowym staje się problem właściwego doboru materiału osłonowego obudowy. Ponadto w przypadku pokrycia ochronnego naniesionego z zewnętrznej strony obudowy, dodatkowym aspektem, który należy uwzględnić przy doborze materiału są jego właściwości mechaniczne. Ma to istotne znaczenie np. w przypadku próby zastosowania obudowy ochronnej z powłoką zewnętrzną do zabezpieczenia rejestratorów parametrów lotu, szczególnie pierwszej i drugiej generacji, wciąż użytkowanych na wielu statkach a nie spełniających obecnie obowiązujących wymagań (tabela 1).

Pierwszy etap badań będzie polegał na wykonaniu obliczeń numerycznych mających na celu dobór optymalnych parametrów geometrycznych oraz określenie właściwości ablacyjnych kompozytów. W kolejnym etapie zostanie zbudowany model obudowy ochronnej, który następnie będzie pokryty warstwą kompozytu o właściwościach ablacyjnych. Wykonany model posłuży do realizacji części eksperymentalnej badań.

Tabela. 1. Wymagania jakości zabezpieczenia zapisanych informacji określone wymaganiami EUROCAE ED55

	Wymagania zgodnie z TSO C123a (CVR), C124a (DFDR)
Ogień wysokiej intensywności	1100°C ogień pokrywający 100% obudowy przez 30 min (60 minut przy wykorzystaniu testu EUROCAE ED55)
Ogień niskiej intensywności,	260°C w czasie 10 godzin (test piekarnika)
Obciążenie uderowe	3 400 jednostek przeciążenia działającego w czasie 6,5 ms
Obciążenie statyczne	5 000 lb (2 265 kg) przez 5 minut wzdłuż każdej osi
Wpływ cieczy agresywnych	Odporność na działanie cieczy roboczych z różnych instalacji SP (paliwo, oleje itp.) przez 24 godziny
Wpływ wody	Działanie wody morskiej przez 30 dni
Odporność na przebicie	Masa 500 lb (226,5 kg) zrzucona z wysokości 10 ft (3,048 m), penetrująca obudowę stalowym ostrzem o średnicy 0,25 in. (6,35 mm)
Ciśnienie hydrostatyczne	Ciśnienie równoważne ciśnieniu wody na głębokości 20 000 ft (ok. 6 000 m)

W wyniku zrealizowanego programu badawczego zostaną określone założenia konstrukcyjne do wykonania obudowy ochronnej, która we właściwy sposób zabezpieczy wybrane urządzenia wyposażenia pokładowego przed wpływem wysokiej temperatury spełniając jednocześnie wymagania eksploatacyjne i wytrzymałościowe.

#### LITERATURA

2. A. Jackowski, Model fizyczny ablacji (opracowanie niepublikowane), WAT, Warszawa 1990,
3. W. Kucharczyk, Rozprawa doktorska "Kształtowanie ablacyjnych właściwości termochronnych kompozytów polimerowych z napelniającymi proszkowymi", Politechnika Radomska 2006,
4. Z. Polak, A. Rypulak, Awionika przyrządy i systemy pokładowe, WSOSP, Dęblin 2002,
5. A. Jackowski, Numeryczne rozwiązanie głównego problemu ablacji. Biuletyn WAT 1986
6. 5 Young-Jae Lee, Hyeok Jong Joo, Investigation on ablation behavior of CFRC composites prepared at different pressure, *Composites Part A. Applied Science and Manufacturing, Elsevier 2004*
7. Yin J. Zhang H. Xiong, X. Huang Boyun, Influence of microstructure of pyrocarbon on ablation performances of C/C composites, *Chinese Journal of Materials Research*, vol. 21, part 1, 2007
8. F. Wojtkun, J. Sołncew, Materiały specjalnego przeznaczenia, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2001

#### PROTECTIVE CONTAINMENT OF AVIONIC EQUIPMENT WITH COATING BASED ON COMPOSITE MATERIAL WITH ABLATIVE CHARACTERISTIC

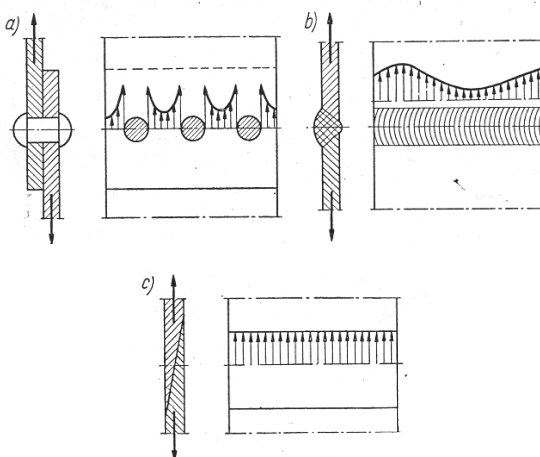
**Abstract.** In the article methods for aircraft avionic equipment protecting from influence of high temperature are presented. Authors proposed using composite materials with ablative characteristic to construct protective containment, which can guarantee optimal work conditions of work of chosen equipment.

Anna RUDAWSKA  
Politechnika Lubelska  
Lublin, Polska

**WPLYW SPOSOBU PRZYGOTOWANIA POWIERZCHNI NA WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZEŃ  
KLEJOWYCH BLACH ZE STALI ODPORNEJ NA KOROZJĘ**

**THE INFLUENCE OF SURFACE TREATMENT ON STAINLESS STEEL SHEETS BONDING  
JOINT STRENGTH**

Technologia klejenia wykorzystywana jest do łączenia materiałów o specyficznych właściwościach, z których wykonywane są elementy o różnorodnych kształtach lub też znajdujących się w różnych miejscach konstrukcji. Za pomocą klejenia można łączyć elementy o niewielkich rozmiarach lub o skomplikowanych kształtach, czasami trudne do połączenia za pomocą innej technologii, z uwagi np. na brak dostępu lub ograniczenie miejsca w analizowanej konstrukcji. W niektórych przypadkach klejenie jest konkurencyjną metodą wykonywania połączeń ze względu na liczne zalety [1-6], wśród których można wymienić możliwość połączenia różnego rodzaju materiałów, w tym m.in. możliwość uniknięcia korozji elektrochemicznej, otrzymanie lżejszej konstrukcji w porównaniu z innymi technologiami, czy też uzyskanie równomiernego rozkładu naprężeń (rys. 1) w porównaniu z innymi rodzajami połączeń, np. nitowymi, czy spawanymi [6].



Rys. 1. Porównanie rozkładów naprężeń w połączeniach: a) nitowanych, b) spawanych, c) klejowych

Pomimo wielu zalet technologii klejenia projektując połączenie określonych materiałów należy zwrócić uwagę na pewne ograniczenia [7, 8], do których można zaliczyć m.in. podleganie procesom starzenia spoin klejowych [1, 2, 8], zmienność warunków eksploatacji połączeń klejowych, skomplikowana niekiedy technologia związana ze sposobem przygotowania powierzchni do klejenia (zwłaszcza materiałów wykazujących trudności w klejeniu [6, 8]), a także zapewnienie często specyficznych warunków utwardzania spoiny klejowej [1, 7, 8].

Projektując lub też dobierając technologię wykonywania połączeń, należy dokonać szczegółowej analizy zarówno zalet, jak i pewnych ograniczeń rozpatrywanych technologii, przy czym niezwykle istotny jest rodzaj łączonego materiału oraz właściwie zaprojektować połączenia.

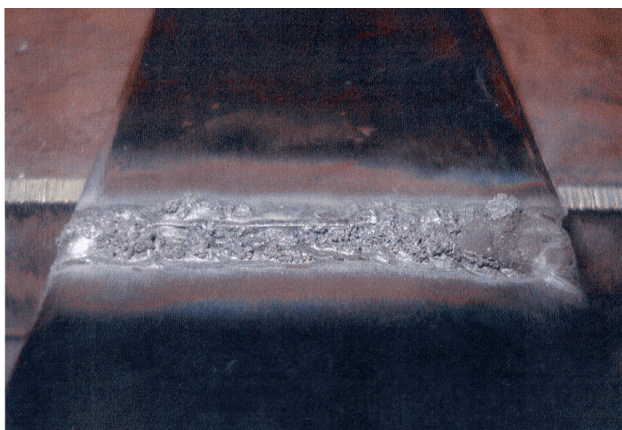
Prezentowany artykuł został przygotowany na podstawie zagadnień rozważanych w jednej z puławskich firm zajmujących się wykonywaniem połączeń blach ze stali kwasoodpornej.

### **ŁĄCZENIE BLACH ZE STALI KWASOODPORNEJ**

Dotychczasowa technologia połączeń blach ze stali kwasoodpornej dotyczyła wykonywania połączeń spawanych. Połączenia spawane ze względu na możliwość przenoszenia dużych obciążeń są często stosowane w różnych konstrukcjach stalowych (maszyny, konstrukcje szkieletowe, mosty i inne) [9, 10]. Blacha ze stali kwasoodpornej wykorzystywana jest w wielu konstrukcjach przemysłu m.in. spożywczego, chemicznego, budowlanego, przede wszystkim z uwagi na swoje właściwości antykorozyjne [10].

Jedną z metod łączenia blach ze stali kwasoodpornej jest spawanie [11, 12], które należy do najpowszechniej wykorzystywanych metod łączenia stali nierdzewnej, chociaż nie wszystkie gatunki tej stali mogą być łączone w procesie spawania [12].

Analizowany materiał ze względu na swoją strukturę i skład chemiczny jest trudny do spawania, ponieważ pod wpływem wysokich temperatur ulega znacznym odkształceniom. Problem ten występuje zwłaszcza w przypadku blach (lub też elementów) o niewielkiej grubości, gdzie przy krawędziach łączonych elementów można zaobserwować zmiany wymiaru, wywołane skurczem spoiny. W przypadku łączenia najczęściej blach o niewielkiej grubości i dużej powierzchni, przy spawaniu ciągłym można zauważyć pofalowanie powierzchni blach w pobliżu spoiny. Inny problem występuje przy spawaniu łukowym elektrodą nietopliwą w osłonie gazu obojętnego, gdzie konieczne jest zastosowanie od spodu łączonych elementów tzw. poduszki gazowej [11, 13]. W przypadku dużych płaskich powierzchni lub też w konstrukcjach, w których brak jest dostępu z drugiej strony łączonych materiałów zastosowanie wspomnianej metody spawania jest niezwykle trudne i kosztowne. Przykład połączeń spawanych, w których nie istniała możliwość zastosowania osłony gazowej z drugiej strony połączenia przedstawiono na rys. 2 [13]. Brak osłony gazowej od spodu elementów spowodował utlenienie się przetopu, a taka sytuacja całkowicie dyskwalifikuje tak wykonaną spoinę.



Rys. 2. Przykład nieprawidłowo wykonanej spoiny spawalniczej ze względu na brak osłony gazowej z drugiej strony łączonych elementów



Na rys. 3 [13] zamieszczono przykład połączenia spawanego otrzymanego w przypadku zbyt małej ilości gazu osłonowego z drugiej strony łączonych elementów. Otrzymano chropowatą i nierówną powierzchnię przetopu, który może być zaakceptowany w spoinach o mniejszych wymaganiach, np. w sytuacji, gdy wymagana jest tylko szczelność.



Rys. 3. Przykład nieprawidłowo wykonanej spoiny spawalniczej ze względu na zbyt małą ilość gazu osłonowego z drugiej strony łączonych elementów

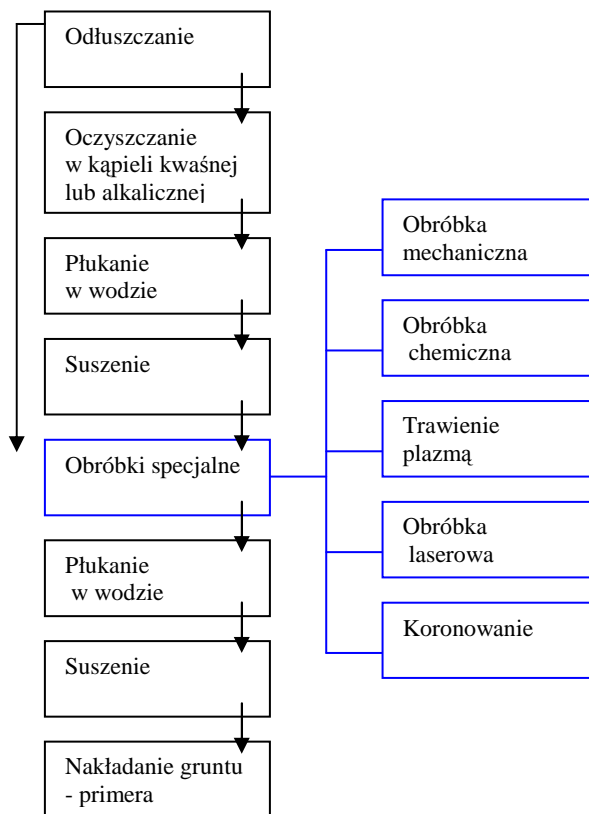
W związku z trudnościami występującymi podczas spawania blach ze stali kwasoodpornej, jako jedną z alternatywnych metod została zaproponowana technologia klejenia. Uwzględniając wytrzymałość połączeń spawanych i klejowych, niewątpliwie większą wytrzymałością charakteryzują się połączenia spawane. Przeprowadzone wstępne badania doświadczalne (na próbkach klejowych jednozakładkowych, których charakterystyka została przedstawiona w pracach [1, 2, 5, 14], wykazały wytrzymałość połączeń spawanych wynoszącą około 435 MPa, co stanowiło około 30 większą wytrzymałość niż dla połączeń jednozakładkowych analizowanych blach ze stali nierdzewnej. Jednak w związku z tym, że badane połączenie będzie przenosiło obciążenia rzędu 2000 N, można zaproponować wykonanie połączenia klejowego w analizowanym przypadku.

Podczas klejenia materiałów konstrukcyjnych istotnym czynnikiem technologicznym wpływającym na uzyskiwaną wytrzymałość połączeń klejowych jest m.in. sposób przygotowania powierzchni. W niniejszym artykule przedmiotem badań będą połączenia klejowe blach ze stali kwasoodpornej, których powierzchnia została poddana różnym operacjom przygotowawczym, powszechnie dostępnych w warunkach warsztatowych.

### PRZYGOTOWANIE POWIERZCHNI

Przygotowanie powierzchni (jako pierwszy etap technologii klejenia) powinno zapewnić uzyskanie jak najsilniejszych wiązań adhezyjnych [1, 8], ponieważ sprzyja to uzyskaniu wysokiej wytrzymałości. Istnieje wiele sposobów przygotowania powierzchni [1, 7, 8], wśród których można wymienić odłuszczenie, obróbkę mechaniczną, obróbkę chemiczną, a także specyficzne rodzaje obróbki, do których zalicza się metodę plazmową [15, 16, 17], metodę wyładowań koronowych [17], czy też obróbkę laserem [18]. Jednakże nie w każdym przypadku łączonych materiałów i w każdym warunkach można te sposoby wykorzystać ze względu na istnienie niekiedy pewnych ograniczeń [1, 7].

Sposób przygotowania powierzchni, metody oraz parametry technologiczne operacji przygotowawczych uzależnione są od wielu czynników, do których należy m.in. rodzaj łączonego materiału, rodzaj produkcji, podczas której wykonywane są połączenia klejowe, czy też warunki warsztatowe, w tym dostępność do odpowiednich przyrządów oraz narzędzi. Jeden ze schematów przedstawiających rodzaje operacji przygotowawczych, możliwych do wykorzystania w procesie przygotowania warstwy wierzchniej wielu materiałów konstrukcyjnych zamieszczono na rys. 4. Rodzaj, występowanie oraz kolejność operacji uzależnione jest od wymienionych czynników.



Rys. 4. Przykład operacji wchodzących w skład procesu przygotowania powierzchni materiałów przeznaczonych do klejenia

W przypadku niektórych rodzajów materiałów konstrukcyjnych przedstawiane są w literaturze informacje dotyczące możliwości zastosowania określonych metod przygotowania powierzchni [7, 8, 19], niekiedy zamieszczane są szczegółowe wytyczne związane np. ze składem chemicznym kąpeli trawiących i czasem trwania takiej kąpeli [1, 8], temperaturą wody w operacji płukania [7], czy też czasem i temperaturą suszenia [8].

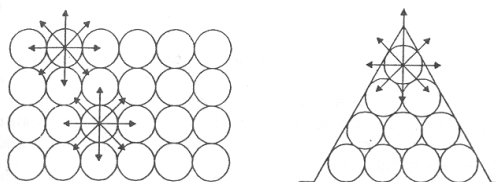
W typowych warunkach warsztatowych najczęściej spotykanymi operacjami przygotowawczymi są m.in. odluszczenie i obróbka mechaniczna [1, 7, 8, 20, 21], głównie ze względu na niezbyt skomplikowane przeprowadzanie tych rodzajów obróbek, przy stosunkowo niskich nakładach finansowych oraz przy założeniu uzyskania określonej wytrzymałości. Podczas zastosowania tego typu obróbek, wspomniany warunek może zostać spełniony przy zastosowaniu specjalnych sposobów przygotowania powierzchni

w celu uzyskania odpowiednich więzi adhezyjnych wpływających na uzyskiwaną wytrzymałość połączeń klejowych. Dlatego też przed przystąpieniem do wykonywania połączeń klejowych, należy przeanalizować wiele czynników wpływających na właściwy dobór sposobu przygotowania powierzchni rozpatrywanych materiałów przeznaczonych do łączenia.

### ODTŁUSZCZANIE I OBRÓBKA MECHANICZNA

Odtłuszczenie jest najczęściej wykonywaną operacją przygotowania powierzchni do klejenia, ponieważ usuwa m.in. wszelkie zanieczyszczenia tłuszczowe stanowiące pozostałości np. po ochronie antykorozyjnej, po różnego rodzaju obróbce skrawaniem itp. Operacja ta może być realizowana różnymi metodami przy wykorzystaniu odpowiednich środków odtłuszczających i za pomocą różnorodnych urządzeń [1, 7, 8]. Niekiedy producenci klejów oferują gotowe produkty o określonych właściwościach i przeznaczeniu, często w bardzo dogodnych do aplikacji opakowaniach [22]. Dobór właściwej metody lub też środka odtłuszczającego uzależniony jest m.in. od rodzaju materiału, a także kształtu, wymiarów gabarytowych, czy też dostępności do powierzchni elementu przeznaczonego do łączenia. Niewątpliwie istotnym czynnikiem, który należy uwzględnić przy operacji odtłuszczenia jest także rodzaj produkcji, który warunkuje użycie zarówno odpowiednich urządzeń, środków, jak i metod operacji przygotowania powierzchni.

Obróbka mechaniczna zaliczana jest do operacji specjalnych przygotowania powierzchni materiałów przeznaczonych do klejenia [1, 8]. Zastosowanie tej obróbki umożliwia zwiększenie rozwinięcia powierzchni, dzięki temu zwiększa się energię powierzchniową oraz zmienia się zakres wysycenia sił międzycząsteczkowych (rys. 5) [2]. Jednakże w pewnych przypadkach sposób ten nie zawsze zapewnia właściwe uaktywnienie energetyczne powierzchni i należy zwrócić szczególną uwagę na kształt mikronierówności uzyskanych po obróbce mechanicznej (zwłaszcza głębokość, szerokość oraz kąt rozwarcia nierówności [8, 17]). Zagadnienie to jest szczególnie istotne w aspekcie wnikania kleju w mikronierówności powierzchni, ponieważ może zaistnieć niekorzystna struktura geometryczna powierzchni (stopień schropowacenia), która niekorzystnie będzie wpływać na ten proces, prowadząc do zmniejszenia wytrzymałości połączeń klejowych [1,8]. W literaturze przedstawiane są zależności określające zarówno proces wnikania kleju, który opisuje prawo Poiseulle'a, jak i głębokość wnikania kleju we wgłębienia materiału chropowatego [17]. Zagadnienia związane z chropowatością powierzchni podczas wykonywania połączeń klejowych, związane z mechaniczną teorią adhezji, uwzględniane są m.in. w publikacjach [1, 7, 8, 19, 21, 23, 25].



Rys. 5. Schemat wpływu chropowatości powierzchni na jej właściwości energetyczne

Istnieje wiele metod obróbki mechanicznej, wśród których można wyróżnić m.in. obróbkę strumieniowo-ścierną, piaskowanie, śrutowanie. Charakterystykę tych metod przedstawiono w licznych pracach, m.in. [1, 7, 8, 25, 26], w niektórych opisano zalecane parametry technologiczne obróbki [1, 17, 24].

Jednym ze sposobów obróbki mechanicznej jest zastosowanie ściernych narzędzi nasypowych [26]. Niewielki koszt, dostępność, łatwość użycia w operacjach ręcznych, możliwość zastosowania w różnych warunkach powoduje, iż ścierne narzędzia nasypowe są często wykorzystywane do obróbki materiałów przeznaczonych m.in. do klejenia. Ważna jest także łatwość w uzyskiwaniu bezkierunkowej struktury śladów obróbki, co jest korzystne, zwłaszcza w warunkach klejenia konstrukcyjnego.

## BADANIA DOŚWIADCZALNE

### Charakterystyka materiałów

Badaniom poddano próbki wykonane ze stali odpornej na korozję o oznaczeniu X5CrNi1810 (PN-EN 10088-1:1998). Skład chemiczny oraz wybrane właściwości mechaniczne zamieszczono w tabeli 1 [10,27].

Tabela. 1. Skład chemiczny oraz wybrane właściwości mechaniczne stali odpornej na korozję X5CrNi1810

Charakterystyka		Rodzaj stali odpornej na korozję
		X5CrNi18-10
Skład chemiczny, stężenie masowe, %	C	≤ 0,07
	Mn	≤ 2,00
	Si	≤ 1,00
	P	≤ 0,045
	S	≤ 0,015
	Cr	17,0÷19,5
	Ni	8,0÷10,5
	N	≤ 0,11
Właściwości mechaniczne	R <sub>m</sub> [MPa]	500-700
	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	≥ 190
	E [GPa]	200
	A [%]	≥ 45
	Twardość HB	≤ 200

Analizowana stal stosowana jest m.in. w przemyśle chemicznym, spożywczym, rafineryjnym na wymienniki ciepła, zbiorniki, pompy, rurociągi.

### Charakterystyka połączeń klejowych

Badaniom poddano połączenia klejowe jednozakładkowe obciążone na ścinanie. Charakterystykę tego typu połączeń przedstawiono w pracach [1, 3, 7, 13]. Długość próbek wynosiła 100 mm, szerokość 20 mm, grubość 1 mm, natomiast długość zakładki, wynosząca 14 mm, została określona (z pewnym przybliżeniem) na podstawie zależności [1]:

$$l_{gr} \geq 5 \sqrt{\frac{E \delta \delta_k}{2G_k}} \quad (1)$$

gdzie: E – współczynnik sprężystości wzdłużnej klejonych elementów,

$\delta$  – grubość klejonych elementów ,

$\delta_k$  – grubość spoiny klejowej (kleju),

$G_k$  – współczynnik sprężystości poprzecznej kleju.

W przypadku analizowanego materiału przyjęto współczynnik sprężystości wzdłużnej E wynoszący 200 GPa [27]. Do wykonania połączeń zastosowano klej epoksydowy Loctite 3430, o współczynniku sprężystości wzdłużnej 2500 MPa [22] i na podstawie informacji zamieszczonych w pracy [2] przyjęto współczynnik sprężystości postaciowej wynoszący 1000 MPa.

Analizowano trzy rodzaje przygotowania powierzchni:

- 1) odtłuszczenie,
- 2) obróbkę mechaniczną,
- 3) obróbkę mechaniczną i odtłuszczenie.

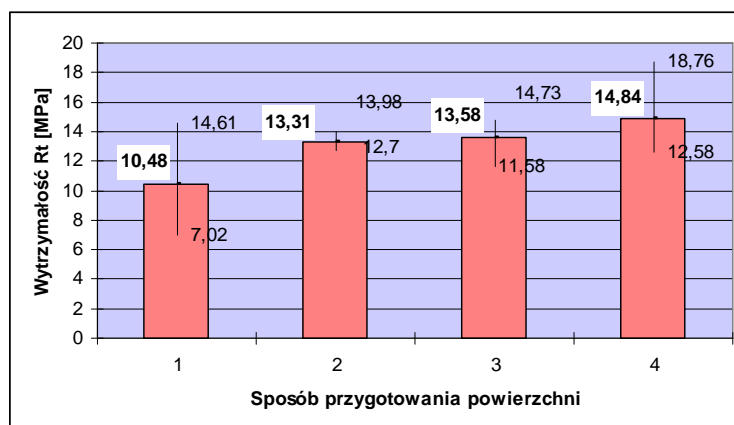
Do odtłuszczenia zastosowano środek odtłuszczający firmy Loctite7063 (na bazie węglowodorów alifatycznych). Obróbka mechaniczna polegała na zastosowaniu obróbki ściernym narzędziem nasypowym P320, po którym uzyskano bezkierunkową strukturę. Niektóre parametry obróbki mechanicznej zamieszczono w pracy [20].

W celach porównawczych wyniki badań wytrzymałościowych odniesiono do połączeń, w których powierzchnia badanych blach nie została poddana żadnemu procesowi przygotowania.

Wykonane połączenia klejowe blach ze stali nierdzewnej poddano badaniom wytrzymałościowym, obciążając je siłą ścinającą. Badania wytrzymałości doraźnej na ścinanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-689300.

### WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań wytrzymałości połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej po różnych sposobach przygotowania powierzchni przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Wytrzymałości połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej po różnych sposobach przygotowania powierzchni: 1) bez przygotowania powierzchni, 2) odłuszczenie środkiem odłuszcającym Loctite7063, 3) obróbka ściernym narzędziem nasypowym P320, 4) obróbka ściernym narzędziem nasypowym P320 i odłuszczenie środkiem odłuszcającym Loctite7063

Po wykonaniu badań wytrzymałościowych, przeprowadzono analizę statystyczną uzyskanych wyników badań, na poziomie ufności  $\alpha = 0,5$ ; wykorzystując odpowiednie hipotezy oraz testy statystyczne [28, 29]. Na jej podstawie można stwierdzić, iż w przypadku zastosowania odłuszczenia (13,31 MPa) i obróbki mechanicznej (13,58 MPa), jako sposobów przygotowania powierzchni blach ze stali nierdzewnej, brak jest statystycznie istotnych różnic w uzyskiwanych wartościach wytrzymałości. W pozostałych przypadkach występują statystycznie istotne różnice na przyjętym poziomie ufności.

Największą wytrzymałość uzyskano w przypadku zastosowania obróbki mechanicznej i następującego po niej odłuszczenia (14,87 MPa), przy czym zauważono dość duże rozbieżności w uzyskanych wynikach badań. Odchylenie standardowe jest znacznie większe niż w przypadku innych sposobów przygotowania powierzchni, czyli powtarzalność uzyskiwanej wytrzymałości wykonywanych połączeń jest znacznie mniejsza niż w przypadku na przykład zastosowania odłuszczenia. Różnica w wartościach wytrzymałości po zastosowaniu odłuszczenia oraz po obróbce mechanicznej i odłuszczeniu wynosi około 10 %.

Na podstawie wyników analizy statystycznej można zauważyć, iż zastosowanie zarówno odłuszczenia, jak i obróbki mechanicznej pozwala na otrzymanie takiej samej wytrzymałości, przy czym większa powtarzalność występuje w przypadku zastosowania odłuszczenia. Wyniki te mogą zostać wykorzystane podczas wykonywania połączeń, bowiem mając do wyboru te dwa sposoby przygotowania powierzchni, można kierować się m.in. prostotą i czasem wykonania tych operacji (uwzględniając fakt otrzymania takiej samej wytrzymałości po zastosowaniu obu operacji przygotowawczych).

Porównując wyniki wytrzymałości połączeń klejowych po operacjach przygotowawczych oraz bez obróbki przygotowującej powierzchnie badanych materiałów do klejenia, zauważono, iż w każdym z analizowanych rodzajów przygotowania powierzchni uzyskano większą wytrzymałość w stosunku do wytrzymałości otrzymanej dla połączeń, w których powierzchnia blach ze stali nierdzewnej nie była poddana operacji przygotowawczej. Ponadto nie stosując żadnego przygotowania powierzchni zauważono największe rozbieżności (największe odchylenie standardowe) w uzyskanych wartościach wytrzymałości połączeń badanych materiałów (uzyskano wartości wytrzymałości od ok. 7 do 14,6 MPa).

## PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy statystycznej wyników tych badań można zauważyć, że:

- 1) wykorzystanie, jako sposobu przygotowania powierzchni blach ze stali nierdzewnej, zarówno odłuszczenia, jak i obróbki mechanicznej, pozwala na uzyskanie znacznej wytrzymałości (w tych przypadkach brak jest statystycznie istotnych różnic w uzyskanych wartościach wytrzymałości na poziomie ufności  $\alpha=0,5$ );
- 2) zastosowanie odłuszczenia po obróbce ściernym narzędziem nasypowym korzystnie wpływa na uzyskiwaną wytrzymałość połączeń klejowych analizowanych blach, chociaż w tym przypadku otrzymano znacznie większe odchylenie standardowe wyników badań, niż w przypadku np. odłuszczenia, czyli powtarzalność otrzymanych wyników badań wytrzymałościowych tego sposobu przygotowania powierzchni jest znacznie mniejsza niż dla wymienionego odłuszczenia;
- 3) we wszystkich rozważanych przypadkach sposobów przygotowania powierzchni uzyskano większą wytrzymałość w porównaniu do wytrzymałości połączeń, w których powierzchnie łączonych materiałów nie zostały poddane jakiegokolwiek obróbce przygotowawczej,
- 4) analizując wyniki badań statystycznych zauważono, iż największe rozbieżności w otrzymanych rezultatach badań wytrzymałościowych otrzymano w przypadku nie zastosowania obróbki przygotowawczej, czyli powierzchnia materiałów dla takiego wariantu może wykazywać zróżnicowane właściwości i nie stosując żadnego przygotowania można otrzymać wyniki o dużej rozbieżności, natomiast otrzymano w przypadku zastosowania operacji odłuszczenia, czyli w tym przypadku można uzyskać największą powtarzalną wytrzymałość połączeń (spośród analizowanych sposobów przygotowania powierzchni do klejenia).

Podsumowując można zauważyć korzystny wpływ zastosowania operacji przygotowania powierzchni na wytrzymałość połączeń klejowych blach ze stali nierdzewnej. Zastosowanie tych operacji znacznie zwiększa powtarzalność uzyskiwanej wytrzymałości, co jest niezwykle istotne podczas opracowywania technologii wykonania połączeń klejowych, która zaliczana jest do procesów specjalnych. Zaprezentowane wyniki badań zostały uzyskane dla przedstawionych warunków wykonywania połączeń klejowych. W sytuacjach, gdy wymagane jest, aby połączenie przenosiło określone obciążenie oraz znana jest wartość tych obciążeń, unikając niektórych trudności w spawaniu blach ze stali nierdzewnej oraz spełniając pozostałe wymagania konstrukcyjne, możliwe jest zastosowanie technologii klejenia w łączeniu blach ze stali odpornej na korozję.

## LITERATURA

1. Godzimirski J., Kozakiewicz J., Łunarski J., Zielecki W.: Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn. Podręcznik akademicki. Wyd. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1997.
2. Kuczmazewski J.: Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali. Wydawnictwa uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin, 1995 r.
3. Godzimirski J.: Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych. WNT, Warszawa 2002.

4. Szabajkiewicz W., Towt A.: Zastosowanie w montażu klejów i tworzy klejopodobnych o właściwościach metalicznych, *Technologia i Automatyzacji Montażu*, nr 2/1994 r.
5. Rudawska A., Kuczmazewski J.: Klejenie blach ocynkowanych. Wydawnictwa Uczelniane PL, Lublin 2005.
6. Sikora R.: tworzywa epoksydowe w naprawie maszyn, WNT, Warszawa 1971 r.
7. Kleje i klejenie. Poradnik inżyniera i technika. Praca zbiorowa pod red. Ch.V. Cagle'a. WNT, Warszawa 1977.
8. Czaplicki J., Ćwikliński J., Godzimirski J., Konar P.: Klejenie tworzyw konstrukcyjnych. WKiŁ, Warszawa 1987.
9. Skoć A., Spalek J.: Podstawy konstrukcji maszyn, T.I. WNT, Warszawa 2006.
10. Dobrzański L.A.: Metalowe materiały inżynierskie, Warszawa, WNT, 2004.
11. Klimpel A.: Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali, Warszawa, WNT, 1999.
12. Chiniewicz W.: „Spawanie stali nierdzewnej”, *Stal-Metale i Nowe Technologie*, nr 11-12/2008 r., s. 30.
13. Praca dyplomowa: Analiza porównawcza celowości stosowania klejenia i spawania do łączenia blach ze stali nierdzewnej. Politechnika Lubelska, Lublin 2009.
14. Rudawska A., Łukasiewicz M.: Wpływ obróbki mechanicznej na wytrzymałość połączeń klejowych wybranych materiałów konstrukcyjnych. *Przegląd Spawalnictwa* nr 8/2008 r.
15. Nakamura Y., Suzuki Y., Watanbe Y.: Effect of oxygen plasma etching on adhesion between polyimide films and metal, *Thin Solid Films* 1996 r.
16. Oehrlein G.S.: Surface processes in low pressure plasmas, *Surface Science*, 1997 r.
17. Żenkiewicz M.: Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych, WNT, Warszawa 2000 r.
18. Babraj E.G., Starikov D., Evans J., Shafeev G.A., Bensaoula A.: "Enhancement of adhesive joint strength by laser surface modification", *Int. Journal of Adhesion and Adhesives* 2007, 27, s. 268-276.
19. Critchlow G.W., Yendall K.A., Barani D., Quinn A., Adreus F.: Strategies for the replacement of chromic acid anodizing for the structural bonding of aluminium alloys. *Int. J. Adhesion and Adhesives*, 26/2006 r.
20. Rudawska A.: Operacje specjalne w technologii klejenia blach ocynkowanych. *Technologia i Automatyzacja Montażu*, nr 2 i 3/2007 r., s. 100-103.
21. Zielecki W.: Wpływ rozwinięcia struktury powierzchni na wytrzymałość zakładkowych połączeń klejowych, *Technologia i Automatyzacji Montażu*, nr 2/3/2007 r.
22. Materiały informacyjno-reklamowe firmy Loctite.
23. Rudawska A., Jacniacka E.: Ocena przydatności parametrów chropowatości powierzchni do określenia wytrzymałości połączeń klejowych. *Przegląd Mechaniczny*, Zeszyt 9S/2005 r.
24. Łunarski J., Zielecki W.: Wpływ struktury geometrycznej powierzchni na wytrzymałość na ścinanie połączeń klejowych. „*Technologia i Automatyzacji Montażu*”, nr 2/1994 r., s. 13-16.
25. Kubik K., Rosienkiewicz P.: Obróbka ścierna. Wrocław 1990.
26. Pszczołowski W., Rosienkiewicz P.: Obróbka ścierna narzędziami nasypowymi. WNT, Warszawa 1995.
27. PN-EN 10088-1:1998.
28. Kryszicki W. i in.: Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Cz.II. Statystyka matematyczna, PWN, Warszawa, 1999.
29. Praca zbiorowa pod red. pod red. P. Konieczki i J. Namieśnika: Ocena i kontrola jakości wyników pomiarów analitycznych, WNT, Warszawa 2007 r.

## THE INFLUENCE OF SURFACE TREATMENT ON STAINLESS STEEL SHEETS BONDING JOINT STRENGTH

**Abstract.** This article resulted from the problematic issue of stainless sheets joining, as observed in one of Polish companies. The joining technology in question is welding and it has proven unsuitable due to severe deformations of the welded material occurring in the consequence of its structure and chemical composition. The problem occurs predominantly in case of small thickness sheets and concerns changing of dimensions. In case of gas metal arc welding of big flat surfaces or constructions where there is either no access to the other side of welded sheets or the access is difficult this method was found to be both cost-ineffective and highly difficult. Due to the numerous drawbacks with welding, an alternative joining method of bonding has been introduced.

This article presents stainless steel sheets bonding joints strength analysis. The essential technological factor in gluing, which influences bonding joint strength, is surface treatment. Therefore, various commonly accessible surface treatment methods were applied to the stainless steel sheets surface.



**Kazimierz RYCHLIK**Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego  
Warszawa, Polska**Mirosław BRAMOWICZ**Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie  
Olsztyn, Polska**METODA NACINANIA GWINTÓW WEWNĘTRZNYCH DLA REGENEROWANYCH  
POŁĄCZEŃ GWINTOWYCH KORPUSÓW TURBIN****METHODS OF INTERNAL THREAD CUTTING FOR REGENERATED  
SCREW JOINT OF TURBINE FRAME**

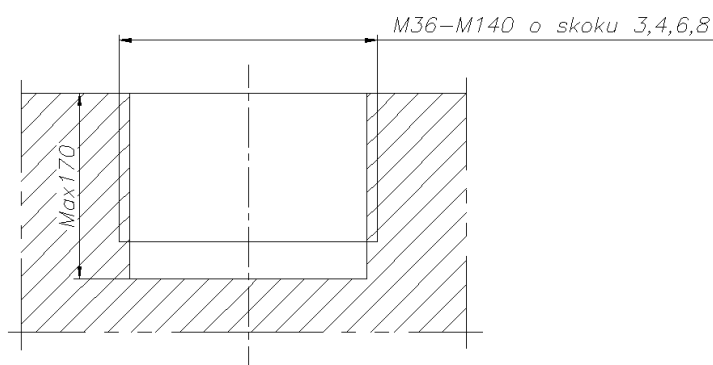
Rozpoznanie rynku wskazuje, że w sektorze obrabiarek przenośnych istnieje duże zapotrzebowanie na obrabiarki z grupy remontowej. Postępujące zużycie elementów o dużych gabarytach wymaga cyklicznego stosowania zabiegów remontowych. Rozmiary przedmiotu obrabianego i wysokie wymagania dokładności obróbki zmuszają zakłady przemysłowe wyspecjalizowane w usługach remontowych do stosowania obrabiarek o znacznych gabarytach i dużych mocach. Zastosowanie takiej metody regeneracji zmusza usługobiorcę do demontażu przedmiotu obrabianego z zespołu, którego jest częścią, co ze względu na ciężar i gabaryty przedmiotu bywa kłopotliwe. Dodatkowo konieczne jest także zapewnić transportu do siedziby usługodawcy. Zakłady przemysłowe oferujące usługi obróbki skrawaniem przedmiotów wielkogabarytowych borykają się z podstawowym problemem, jakim jest obciążenie znaczną ilością zamówień, a których okres realizacji wynosi od kilku miesięcy do kilku lat. Konieczność odciążenia obrabiarek wielkogabarytowych oraz przerwy w pracy spowodowane czynnikami losowymi sprawiają, że możliwości wykonania mniejszej usługi nie ujętej w planach produkcyjnych firmy jest znikoma. Odpowiedzią na bolączki obu stron wydaje się nowy trend w dziedzinie obróbki skrawaniem zwany „*IN – SITU machining*” (obróbka w miejscu pracy) lub „*ON – SITE machining*” (obróbka na miejscu pracy). Obrabiarki przeznaczone do tego typu obróbki mają kompaktowe rozmiary a jednocześnie pozwalają uzyskać duże dokładności, które są wymagane przez odbiorców.

**ZADANIE TECHNOLOGICZNE**

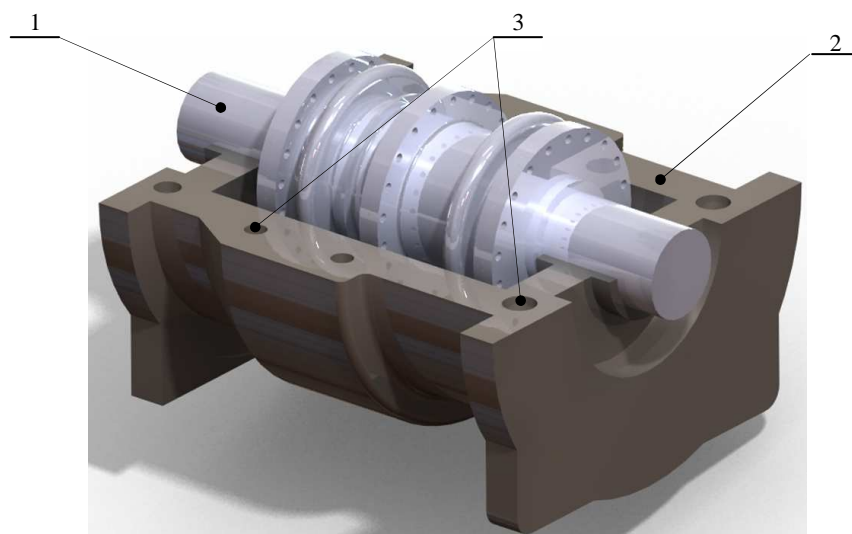
Jednym z zadań technologicznych realizowanych przez grupę obrabiarek przenośnych zaprojektowanych i wykonanych w Zakładzie Obrabiarek Instytutu Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego było wykonanie gwintu wewnętrznego korpusach turbin (rys. 1).

Przedstawione parametry wynikają bezpośrednio z rodzaju połączeń występujących w korpusach turbin parowych i gazowych oraz przyjętych założeń technologicznych.

Podczas remontu korpus turbiny rozdzielany jest na dwie połowy (rys. 2). Połowy te połączone są przy pomocy specjalnych śrub. W trakcie odkręcania, w większości przypadków, śruby urywane są. Stan ten wymaga specjalnego podejścia do przedstawianego zagadnienia. Urywane śruby mogą być wyjęte z zastosowaniem różnych metod jednak użycie tego samego gwintu znajdującego się w korpusach do kolejnego łączenia połówek korpusu jest niedopuszczalne. Istnieje, zatem konieczność ponownego wykonania gwintu w miejscu gdzie doszło do urwania śruby.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny przedmiotu ze wskazanym zadaniem technologicznym



Rys. 2. Model wału z połową korpusu turbiny: 1 – wał turbiny, 2 – korpus turbiny, 3 – otwory montażowe

### TECHNOLOGIA OBRÓBK

Dla skutecznej realizacji przedstawionego zadania technologicznego została opracowana technologia nacinania gwintu wewnętrznego składająca się z dwóch głównych etapów:

- Etap 1 – Przygotowanie otworu pod gwint (planowanie powierzchni urwanej śruby, wiercenie wstępnego otworu, roztaczanie otworu na wymiar pod odpowiedni gwint).
- Etap 2 – Wykonanie gwintu (nacięcie nowego gwintu).

#### *Przygotowanie otworu pod gwint*

Pierwszym zabiegiem wykonywanym podczas regeneracji jest wiercenie wstępne otworu. Czasami jednak można wykonać planowanie czoła urwanej śruby, co ułatwia późniejszą pracę wiertła w początkowym jego okresie skrawania.

Wiercenie otworu zostało zrealizowane wiertłem T-MAX U R416.2-0450L-41 – SANDVIK COROMANT zamocowanym w oprawce narzędziowej 7620, 50-50-110 – BISON- BIAL, co przedstawia rys. 3.

Podczas badań zaobserwowano, że na głębokości 90 [mm] wierzonego otworu wióry powodują zapychanie kanałów wiórowych a w konsekwencji przeciążenie i zatrzymanie obrabiarki. Badania prowadzone były bez użycia sprężonego powietrza planowanego do wydmuchiwania wiórów. W kolejnym kroku zmieniono posuw na obrót do 0,025 [mm/obr], co wyeliminowało zjawisko zapychania.



Rys. 3. Wiercenie otworu wstępnego: a) narzędzie, b) wióry

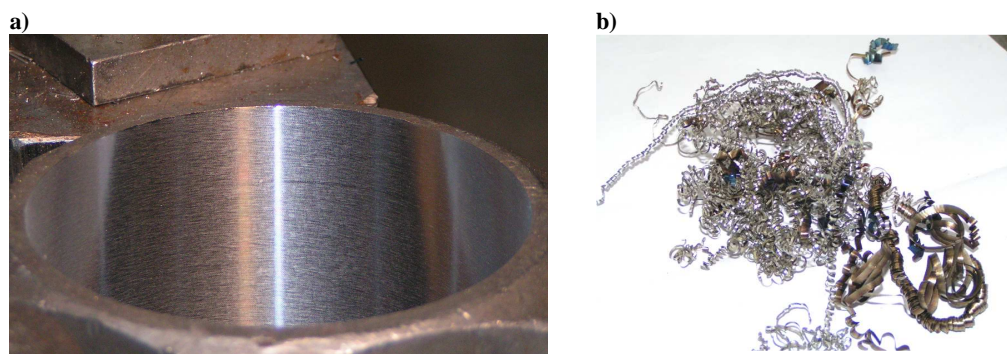
Kolejnym zabiegiem realizowanym podczas regeneracji połączeń gwintowych jest roztaczanie otworu na odpowiedni wymiar.

Wytaczanie otworów zostało wykonane przy użyciu głowicy narzędziowej TA-170 D'ANDREA z parametrami przedstawionymi w tabl. 1.

Tablica 1. Parametry roztaczania otworów.

L.p.	Parametr	Wartość
1.	Średnica wytaczania	$\varnothing 45 \div 140$ [mm]
2.	Głębokość warstwy skrawanej	$1 \div 4$ [mm]
3.	Prędkość obrotowa wrzeciona	300 [obr/min]
4.	Posuw na obrót	0,025 - 0,05 – 0,01 [mm/obr]
5.	Prędkość skrawania	$42 \div 130$ [mm/min]

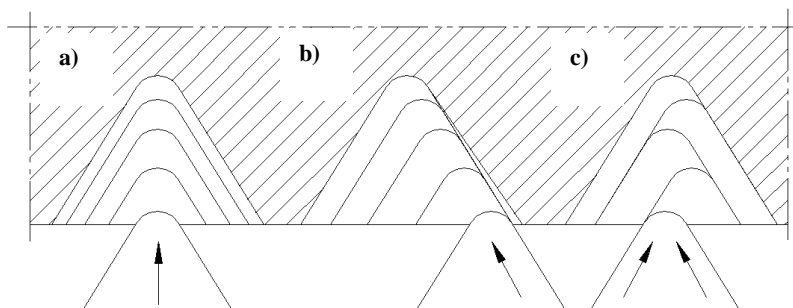
W wyniku przeprowadzonych prób obróbkowych i badań zostały zoptymalizowane parametry skrawania, przy których obrabiana powierzchnia (rys. 4) uzyskała wymagane parametry.



Rys. 4. Roztaczanie otworu: a) przedmiot obrabiany, b) wióry

### Wykonanie gwintu

Nacinanie gwintu przy regeneracji połączeń śrubowych korpusów turbin jest zabiegiem najtrudniejszym. Gwinty wewnętrzne można wykonywać różnymi narzędziami. Mogą to być gwintowniki, frezy, noże itp. Ograniczenia jednak wynikające ze specyfiki przedmiotu i procesu regeneracji nie pozwalają jednak na dowolny wybór metody gwintowania. W przedstawianym przypadku jedynym sposobem wykonania gwintu było zastosowanie noża z płytką. Dla wykonania gwintu wewnętrznego płytką istnieją trzy różne metody zagłębiania się narzędzia w obrabiany przedmiot (rys. 5).



Rys. 5. Metody zagłębiania się płytki w obrabiany przedmiot podczas gwintowania: a) dosuw wglębny, b) zmodyfikowany dosuw boczny, c) dosuw wglębny naprzemienny

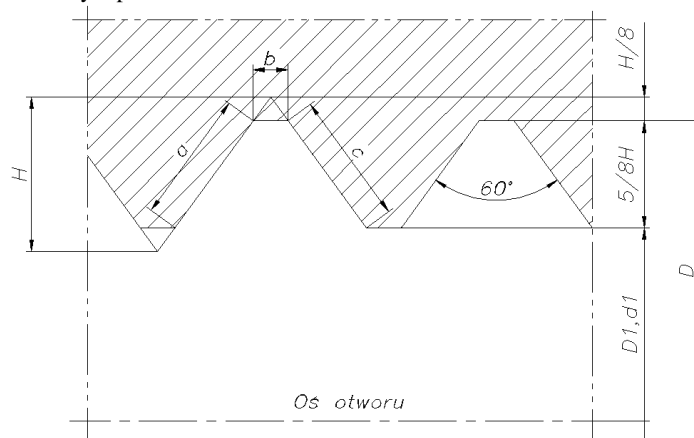
Dosuw wglębny (rys. 5, poz. a) to typowy sposób, szeroko stosowany tam gdzie płytka jest zagłębiania pod kątem w stosunku do przedmiotu obrabianego i jest formowany sztywny wiór w kształcie V, na obu stronach krawędzi skrawającej. Zużycie narzędzia na obu stronach płytki jest bardziej równomierne, a metoda ta jest bardziej odpowiednia do małych skoków i materiałów utwardzających się w czasie obróbki.

Zmodyfikowany dosuw boczny (rys. 5, poz. b) jest to metoda korzystna do nowoczesnych operacji toczenia gwintów na obrabiarkach sterowanych numerycznie. Są one oprogramowane do przeprowadzenia takiej obróbki w poszczególnych cyklach. Płytkę jest zagłębiania pod kątem, którego miarą jest równa mierze kąta zarysu, pomniejszonej o miarę kąta przyłożenia. Luz za skrawającym narożem, jak w typowych operacjach toczenia, powinien zostać zapewniony w kierunku posuwu. Kontrola wióra jest lepsza, proces jest bardziej zbliżony do typowego procesu toczenia i do zastosowanych płytek łamiących wiór z geometrią typu C. W metodzie tej podczas skrawania wydzielą się mniej ciepła, a bezpieczeństwo produkcji jest wysokie. Skłonność do drgań może wzrosnąć podczas wykonywania gwintów o mniejszych skokach lub gdy powierzchnia styku jest znaczna, co może być ograniczone przez zastosowanie bocznego dosuwu wglębego.

Dosuw wglębny naprzemienny (rys. 5, poz. c) to metoda używana zazwyczaj do większych zarysów. Płytkę wykonuje skrawanie w naprzemiennych przejściach. Zużycie płytki postępuje równomiernie. Jedna strona zarysu gwintu jest wykonywana w kilku naprzemiennych przejściach. Narzędzie jest wtedy przesuwane i kolejna strona zarysu obrabiana jest w ten sam sposób i tak dalej aż do uzyskania pełnego zamierzonego zarysu.

Wszystkie przedstawione metody znajdują swobodne zastosowanie w przypadku kiedy wykonywany jest gwint zewnętrzny. Narzędzia obróbkowe posiadają dużo miejsca dzięki czemu mogą posiadać odpowiednio sztywną konstrukcję. W przypadku wykonywania gwintów wewnętrznych sytuacja się mocno komplikuje. Wymiary narzędzi są ograniczone wymiarami otworu wstępnego, w którym będzie nacinany gwint. Zbyt mała średnica otworu oraz zbyt duża głębokość wpływa bardzo niekorzystnie na sztywność narzędzia. Przy tak niekorzystnych ograniczeniach należałoby poszukiwać metody nacinania gwintu gdzie występujące siły skrawania są najmniejsze. W tym przypadku odpowiednią metodą wydawać by się mogła metoda zmodyfikowanego dosuwu wglębego. Analiza zarysu gwintu (rys. 6) wykazuje, iż długość czynnej krawędzi skrawającej będzie się zwiększała stopniowo zależnie od skoku gwintu zaś zmniejszała się

grubość warstwy skrawanej. Istotnym jest, aby pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej utrzymywane było na stałym poziomie.



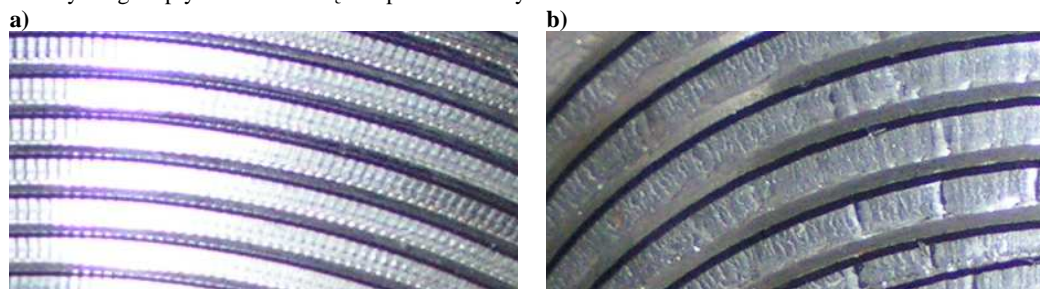
Rys. 6. Zarys gwintu metrycznego

Przy zastosowaniu metody zmodyfikowanego posuwu wglębnego i założeniu, że grubość warstwy skrawanej będzie wynosiła 0,05 [mm] (tabl. 2) najtrudniejszym gwintem do wykonania będzie gwint o skoku 8 [mm].

Tablica 2. Parametry warstwy skrawanej

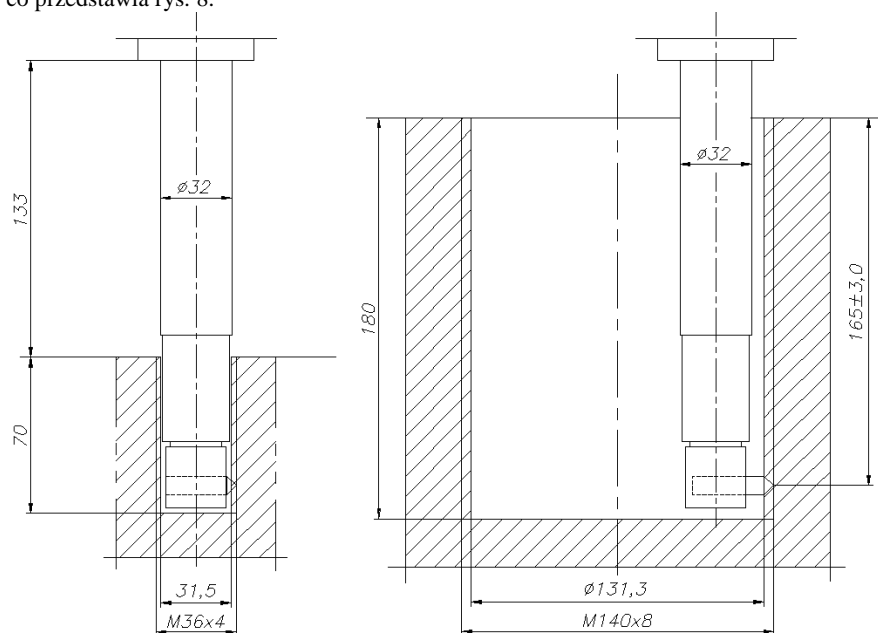
L.p.	Skok gwintu [mm]	Max szerokość warstwy skrawanej [mm]	Grubość warstwy skrawanej [mm]	Pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej [mm <sup>2</sup> ]
1.	3	2,2	0,05	0,11
2.	4	3	0,05	0,15
3.	6	4,4	0,05	0,22
4.	8	6	0,05	0,3

Przeprowadzone analizy wykazały, że wykonanie gwintu M8 na średnicy 140 [mm] wymagało będzie zapotrzebowania momentu ok. 40 [Nm] a siła skrawania wynosiła będzie ok. 600 [N]. Skutki niekorzystnego wpływu sił na narzędzie przedstawia rys. 7.



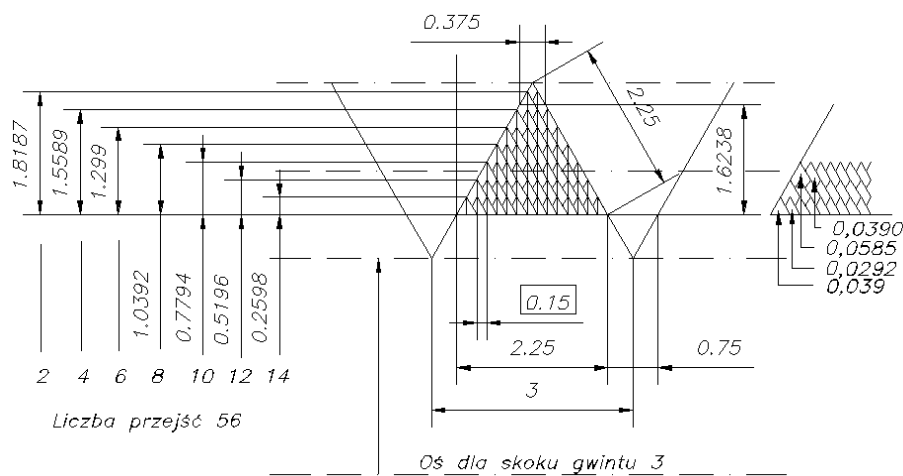
Rys. 7. Powierzchnia gwintu po obróbce metodą zmodyfikowanego posuwu wglębnego:  
a) gwint o skoku 3, b) gwint o skoku 8

Konstrukcja narzędzia jak wcześniej wspomniano została ograniczona wymiarami wstępnego otworu, co przedstawia rys. 8.



Rys. 8. Ograniczenia technologiczne dla wykonywanych gwintów

Dla rozwiązania problemu została zaproponowana inna metoda wykonywania gwintu. Aby uzyskać małe siły skrawania zostały ograniczone pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej. Wprowadzono metodę wierszowania wglębnego (rys. 9). Metoda polega na stopniowym skrawaniu poszczególnych warstw zarysu gwintu w kilku lub kilkunastu przejściach narzędzia po jednej warstwie.



Rys. 9. Wierszowanie gwintu o skoku 3 [mm]

Jak przedstawiono na rys. 9, liczba przejść narzędzia dla gwintu o skoku 3 [mm] nie jest zbyt duża. Liczbę tę można ograniczać stosując większe odstępstwa pomiędzy poszczególnymi przejściami narzędzia na tej samej warstwie. Należy jednak mieć na uwadze wzrastające siły skrawania i niekorzystny ich wpływ na obrabianą powierzchnię gwintu.

Problem wykonywania gwintów szczególnie się nasila w rozpatrywanym przypadku dla gwintów o skoku 6 i 8 [mm]. Liczba przejść narzędzia wynosi ok. 400. Do tego typu metody niezbędne jest sterowanie numeryczne maszyny w 3 osiach.

#### PODSUMOWANIE

Zapotrzebowanie na usługi remontowe przedstawionego typu występują w wielu gałęziach przemysłu. Regeneracja wielkogabarytowych przedmiotów w miejscu pracy pozwala zaoszczędzić dużo czasu potrzebnego na demontaż i transport przedmiotu obrabianego do zakładu remontowego jak również kosztów wynikających z postoju urządzenia.

Przedstawiona metoda wykonywania gwintów zewnętrznych została opracowana przez Zakład Obrabiarek IMBiGS i wdrożona w zakładzie produkcyjnym. Zastosowanie przedstawionej metody wymaga jednak w każdym przypadku szczegółowej analizy sztywności narzędzia, parametrów skrawania, konfiguracji obrabiarki itp. Dla realizacji przedstawionej metody wymagane jest zastosowanie specjalnej obrabiarki ze sterowaniem CNC w trzech osiach.

#### LITERATURA

1. Jemielniak K.: Obróbka Skrawaniem. Warszawa, OWPW, 1998.
2. Olszak W.: Obróbka skrawaniem. Warszawa, WNT, 2008.
3. Rychlik K., Jastrzębski M.: Problemy technologiczne obróbki otworów w wielkogabarytowych przedmiotach-modułowe obrabiarki przenośne. Warszawa, TIAM Nr 2, 2009.
4. Rychlik K., Jastrzębski., Rutkowski K.: Obróbka otworów montażowych w połączeniach kołnierzych wałów turbin gazowych i parowych, Warszawa, Przegląd Mechaniczny Nr 11, 2009.
5. Rychlik K., Jastrzębski M., Pabich M.: Adaptacja współrzędnościowej obrabiarki na potrzeby zadaniowej obróbki korpusów turbin. Warszawa, TIAM Nr 4, 2009.
6. Szymczak W.: Opracowanie dokumentacji konstrukcyjnej oraz wykonanie współrzędnościowej jednostki obróbkowej typ LNB-64. Warszawa, Biuletyn Naukowo-Techniczny OBK KOPROTECH Nr 20, 2004.
7. Szymczak W.: Technologia usuwania urwanych śrub z pomocą obrabiarki typ LNB-68. Warszawa, TIAM Nr 1, 2008.
8. Wzór użytkowy W 117914 – Obrabiarka zadaniowa.
9. Patent P 386939 – Sposób i wytaczarka precyzyjna przenośna do wytaczania otworów w kołnierzach wałów turbin i wałów okrętowych.
10. Poradnik obróbki skrawaniem firmy Sandvik Coromant.

#### METHODS OF INTERNAL THREAD CUTTING FOR REGENERATED SCREW JOINT OF TURBINE FRAME

This paper presents method of internal thread production during frame turbine regeneration. There are shown all stages of process realisation and characterised particular technological tasks. Present essential technological bound results from used methods and ways of solving described problem.

