

Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry

Metaliczne materiały kompozytowe w aplikacjach lotniczych (w tym materiały typu Glare)

Composite metallic materials in aviation applications (including Glare-type materials)

Politechnika Lubelska, Politechnika Rzeszowska, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Politechnika Śląska, Instytut Lotnictwa w Warszawie
Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

Wyniki badań Results

Badania wpływu środowiska na trwałość laminatów metalowo-włóknistych (FML) typu Glare® Investigation of the environmental effect on stability in Fiber Metal Laminates (FML) type Glare®

Przedmiot badań stanowiły:
- polimerowe materiały kompozytowe wzmocnione włóknami szklanymi i węglowymi,
- laminaty metalowo-włókniste

The subject of research:
- Polymer composite materials with glass and carbon fibers,
- Fiber Metal Laminates based on aluminium and polymer composite (glass and carbon fibers).

Tabela 1. Oznaczenia i konfiguracja próbek kompozytów
Table 1. Signature and configuration of composite samples

Tabela 2. Wymiary próbek przeznaczonych do badań
Table 2. Samples size for different tests

Nazwa laminatu	Układ warstw oraz grubość białej aluminium [mm]	Pre-pręgi oraz orientacja warstw pre-pręgi [°]	Siłownia b-grubość laminatu [mm]
GFRP 1	6w		1,1
GFRP 2	6w		1,63
GFRP 3	6w		2,15
GFRP 4	15w		2,65
CFRP 1	6w		1,08
CFRP 2	15w		1,68
CFRP 3	15w		1,9
CFRP 4	21w		2,71
AG 1	[2]1 0,3		1,08
AG 2	[2]1 0,5		1,53
AG 3	[3]2 0,3		1,92
AG 4	[3]2 0,5		2,55
AG 1	[2]1 0,3		1,1
AG 2	[2]1 0,5		1,53
AG 3	[3]2 0,3		1,94
AG 4	[3]2 0,5		2,51

Rodzaj laminatu	Pochłanianie wilgoci wymiary [mm]	Wytrzymałość na rozciąganie wymiary [mm]	Zginanie krótkiej belki Wymiary [mm]	Rozstaw podpór [mm]
GFRP 1	100x100		11x5,5x1,1	4,4
GFRP 2			16,3x5,15x1,63	6,52
GFRP 3	100x100		21,5x10,75x2,15	8,9
GFRP 4			26,5x13,25x2,65	10,6
CFRP 1	100x100		10,8x5,4x1,08	4,32
CFRP 2			16,8x5,4x1,68	6,72
CFRP 3	100x100		19,2x9,5x1,9	7,60
CFRP 4			27,1x13,55x2,71	10,84
AG 1	100x100		10,8x5,4x1,08	4,32
AG 2			15,3x7,65x1,53	6,12
AG 3	100x100		19,2x9,5x1,92	7,60
AG 4			25,5x12,75x2,55	10,2
AG 1	100x100		11x5,5x1,1	4,4
AG 2			15,3x7,65x1,53	6,12
AG 3	100x100		19,2x9,5x1,94	7,38

Badania wpływu czynników środowiskowych na strukturę oraz wybrane właściwości mechaniczne przeprowadzono w oparciu o normy: ASTM D 5229, ASTM D 2344, PN EN ISO 527-4.

Investigation of the environmental effect on the structure and selected mechanical properties was based on the following standards: ASTM D 5229, ASTM D 2344, PN EN ISO 527-4.

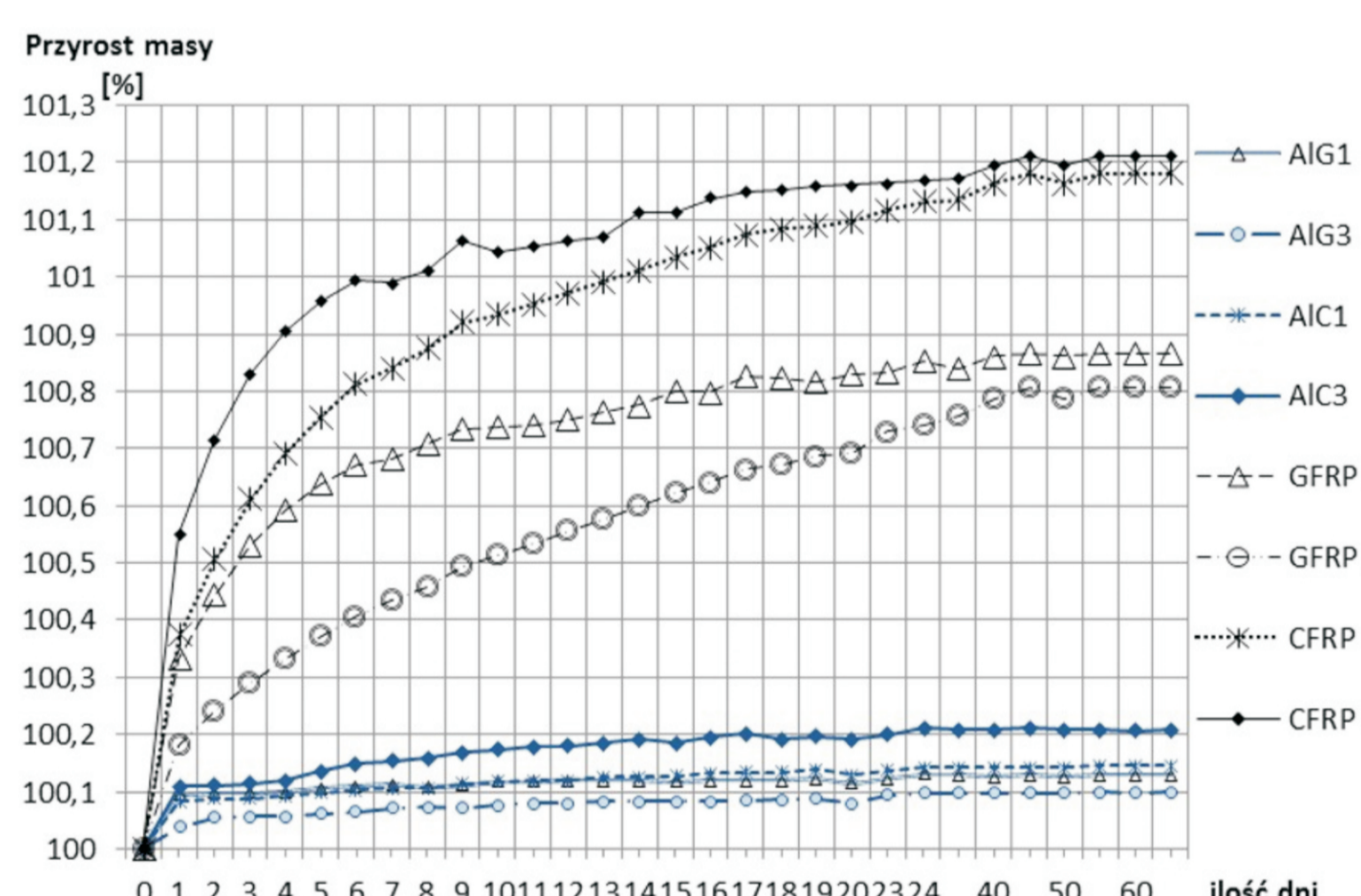
Badania procesów desorpcji oraz absorpcji Investigation of a desorption and absorption

Próbki laminatów (tabela 2) umieszczono w komorze suszarki oraz poddano procesowi klimatyzowania w temperaturze 70°C przez 240 godzin. Po osiągnięciu stanu równowagowego próbki zostały przeniesione do komory środowiskowej, przeprowadzając proces sezonowania przy parametrach: temperatura 60°C, wilgotność 99% (środowisko wody destylowanej), czas- 60 dni. Podczas procesu sezonowania cyklicznie z odstępem 24h wykonywane były pomiary masy próbek. Pozostałe próbki do badań wytrzymałościowych poddano identycznemu procesom klimatyzowania, bez rejestrowania masy tych próbek.

Samples (Table 2) were placed in a drying oven chamber and subjected to a process of conditioning at 70°C for 240 hours. After the state equilibrium was reached, samples were transferred to environmental chamber where the seasoning process was carried out using the parameters: temperature 60°C, humidity 99% (environment distilled water), time-60 days. During the process of seasoning cycles with an interval of 24h were performed measurements the weight of the samples. The other samples were subjected to strength tests an identical conditioning process without recording the weight of the samples.

Przeprowadzone badania wykazały, że:
- na etapie desorpcji oraz absorpcji laminaty polimerowe charakteryzują się blisko 10-krotnie większą zmianą masy podczas procesu klimatyzowania w porównaniu do badanych laminatów metalowo-włóknistych.
- w grupie laminatów polimerowych większą absorpcję wykazują próbki z kompozytu węglowo-epoksydowego.

The study showed that:
- the absorption and desorption step in polymer laminates are characterized by nearly 10-times more changes of weight during the conditioning process, compared to the tested FML.
- in the group of polymer laminates the greater absorption showed the polymer samples with carbon fibers.



Rys.1. Przebieg zmian masy próbek podczas procesu klimatyzowania
Fig.1. Weight changes of samples during the conditioning

Statyczna próba rozciągania Static tensile test

Tabela 3. Wyniki statycznej próby rozciągania kompozytów
Table 3. Results of static tensile tests in composites

Rodzaj laminatu	Referencyjne			Po ekspozycji na warunki środowiskowe			Różnica %		
	R _m [MPa]	E [GPa]	ε [%]	R _m [MPa]	E [GPa]	ε [%]	R _m	E	ε
GFRP 1	687,5	40,46	2,14	476,3	42,73	1,19	-30,72	6,61	-46,29
GFRP 2	645,1	41,27	1,58	429,5	38,22	1,21	-33,42	-7,39	-23,42
GFRP 3	656,3	41,73	1,59	445,6	36,95	1,16	-32,10	-11,45	-27,04
GFRP 4	654,2	40,34	1,65	418,4	38,02	1,26	-36,04	-6,79	-23,64
CFRP 1	1005,5	80,61	1,26	893	78,84	1,14	-10,74	-2,20	-9,50
CFRP 2	912,0	74,31	1,25	886,9	73,92	1,19	-2,75	-0,52	-4,82
CFRP 3	1007,1	67,23	1,59	991,2	68,04	1,46	-7,11	1,20	-8,18
CFRP 4	981,8	73,38	1,35	875,5	65,51	1,33	-10,83	-9,36	-14,48
AG 1	653,3	53,23	3,72	500,5	47,96	3,03	-23,39	-9,90	-18,55
AG 2	606,0	58,70	3,76	549,5	58,22	2,80	-8,32	-0,82	-25,53
AG 3	705,3	50,44	3,88	574	49,83	3,31	-18,62	-1,21	-14,25
AG 4	648,2	58,79	4,12	514,5	51,70	3,18	-20,63	-7,33	-22,82
AIC 1	708,5	66,56	2,34	699,5	67,82	2,27	-1,27	1,89	-2,99
AIC 2	636	71,20	2,16	599,5	69,47	2,05	-6,74	-2,43	-4,65
AIC 3	765,72	69,35	1,86	647	66,41	1,63	-15,50	-4,24	-12,37
AIC 4	674	95,764	2,24	603	82,24	1,87	-10,53	-14,12	-16,52

Wyniki uzyskane w statycznej próbie rozciągania wskazują, że:
- klimatyzowanie w warunkach podwyższonej temperatury oraz wilgotności prowadzi do spadku naprężenia zrywającego, modułu E oraz odkształcenia przy zerwaniu w kompozytach CFRP i GFRP oraz FML.
- w grupie kompozytów CFRP próbki uzyskały wyniki zbliżone, przy czym trwała ekspozycja na warunki środowiskowe spowodowała spadek R_m o 30-36%, przy jednoczesnym zachowaniu tendencji spadkowej dla pozostałych parametrów oprócz wartości modułu E dla próbek GFRP1.
- w grupie kompozytów CFRP odnotowano mniejszą różnicę wartości R_m w zakresie ok. 3-11% przy jednocześnie większym poziomie wytrzymałości wyjściowej w porównaniu do kompozytów GFRP.
- dla próbek referencyjnych oraz po klimatyzowaniu w warunkach środowiskowych uzyskano większe rozbieżności wyników przy różnych ilościach warstw w laminacie dochodzące do 150 MPa.
- sztywność kompozytów CFRP zmniejsza się pod wpływem oddziaływania czynników środowiskowych do 10%.
- R_m oraz sztywność próbek AIG zmniejsza się po procesie klimatyzowania o wartość nie większą niż 23% oraz 10% w przypadku sztywności.

The obtained results in the static tensile test indicate that:
- conditioned at elevated temperature and humidity leads to decrease in ultimate tensile strength, Young's modulus, strain in failure in both CFRP, GFRP and FML.
- CFRP samples obtained results converge, with continued exposure environmental conditions resulted in a decrease in tensile strength of 30-36%, while maintaining a downward trend for the other parameters in addition to the Young's modulus values for the GFRP1 samples.
- CFRP samples reported a smaller difference in tensile strength values in the range about 3-11% together with greater baseline strength level compared to GFRP.
- the reference and environmental conditioned samples with more varied results were obtained for different amounts of layers in the laminate of up to 150 MPa.
- in CFRP composite the stiffness is decreased by the impact of environmental factors up to 10%.
- tensile strength and stiffness of AIG is reduced after the process of conditioning and the strength value is not more than 23% and 10% rigidity in the case of test samples.

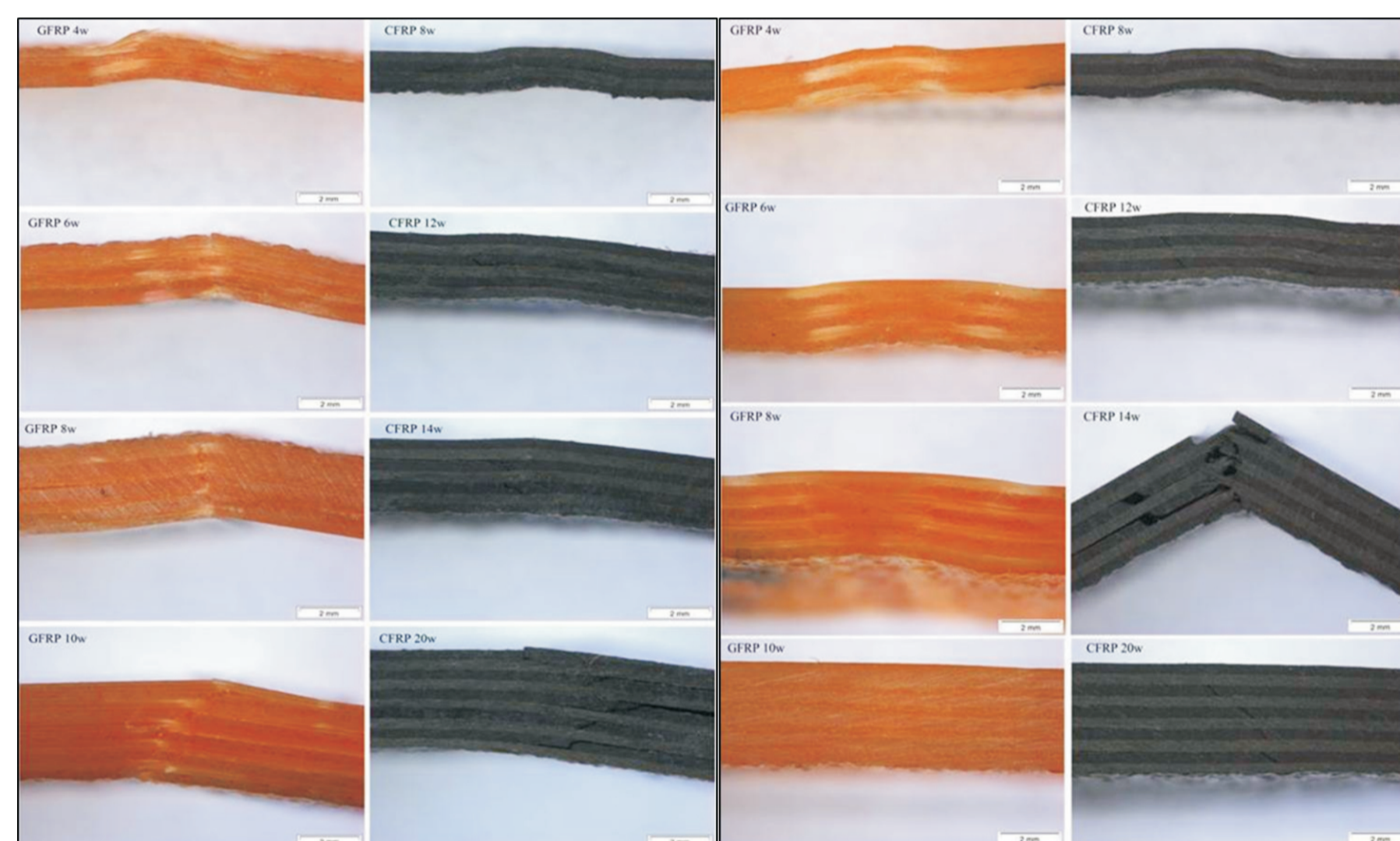
Próba zginania krótkiej belki Short beam bending test

Wytrzymałość na ścinanie międzywarstwowe (ang. ILSS) lub τILSS (naprężenie styczne określające ILSS) przeprowadzono dla próby 3-punktowego zginania krótkiej belki.

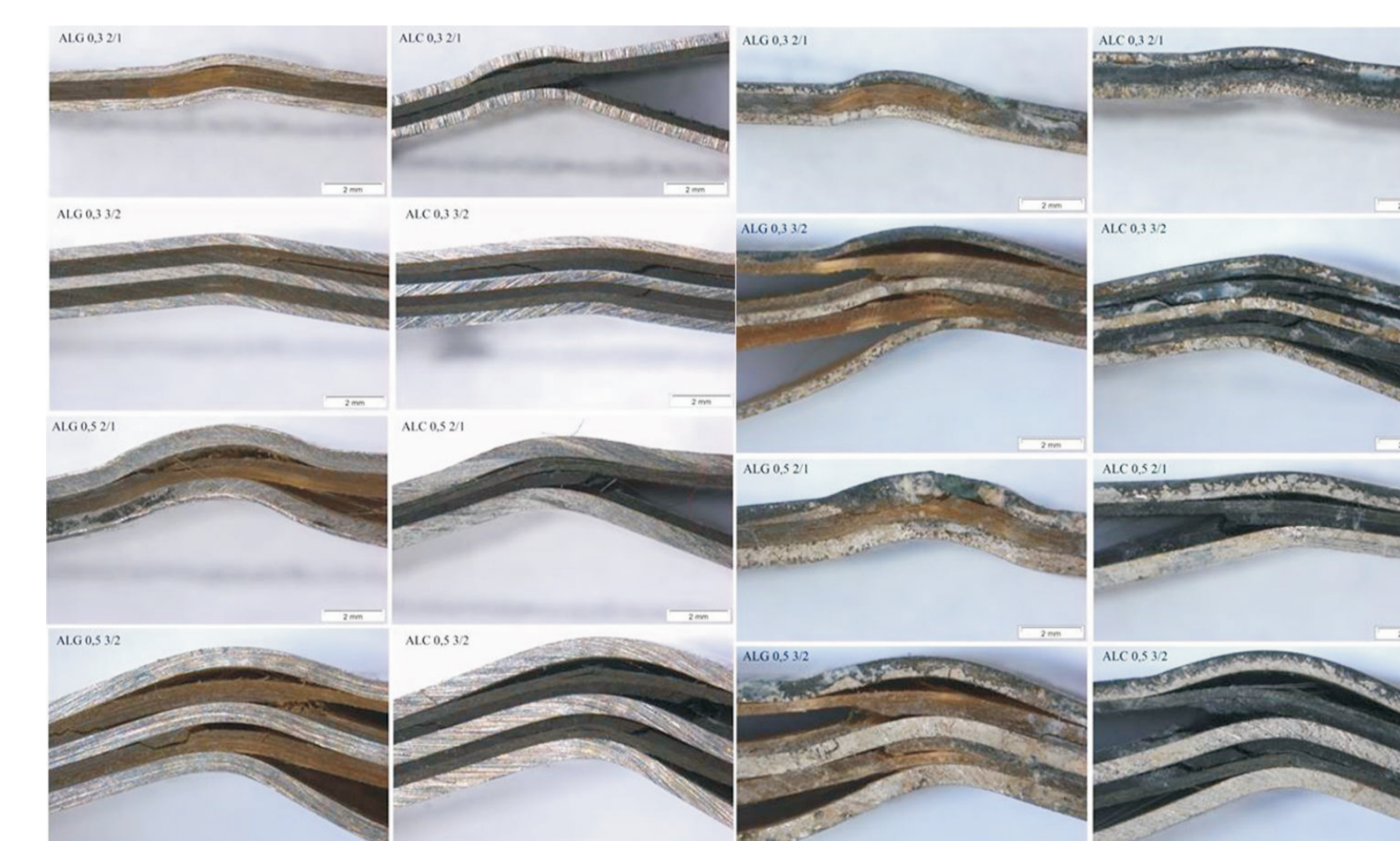
Interlaminar shear strength (ILSS) or τILSS (ILSS determining shear stress) was performed for the sample using the short beam 3-point bending test.

Wykonane badania zginania wykazały spadek wartości ILSS dla prawie wszystkich grup badanych laminatów pod wpływem ekspozycji na czynniki środowiskowe.

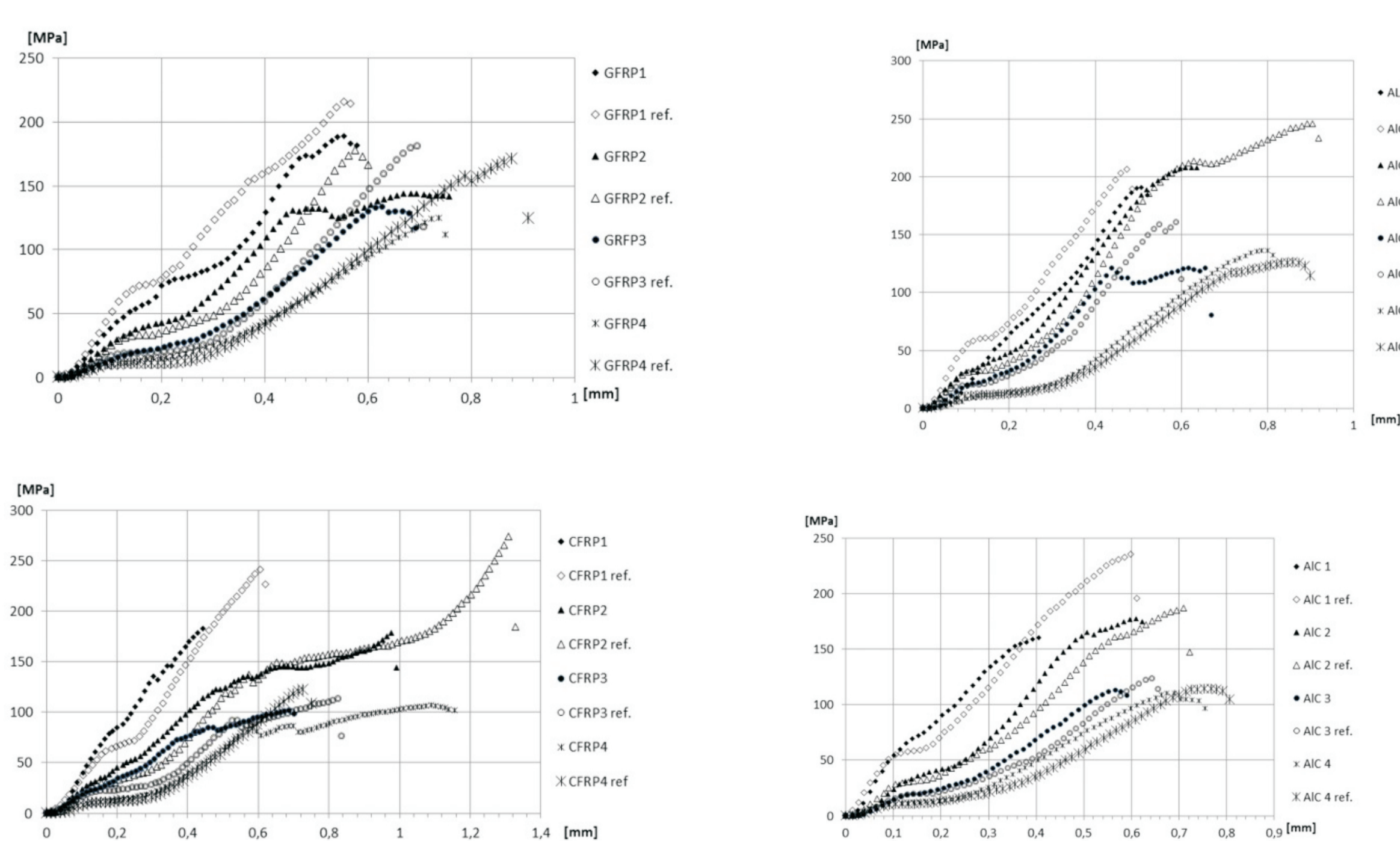
3-point bending test showed a decrease in the value of ILSS for almost all samples under the influence of exposure to environmental factors.



Rys.2. Powierzchnia boczna próbek GFRP i CFRP kompozytów po badaniu wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe (2 kolumny po lewej- po procesie klimatyzowania, 2 kolumny po prawej- próbki referencyjne).
Fig.2. The lateral surface of GFRP and CFRP samples after ILSS tests (2 columns on the left-samples after conditioning, 2 columns on the right - the reference samples).



Rys.3. Powierzchnia boczna próbek FML po badaniu wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe (2 kolumny po lewej- po procesie klimatyzowania, 2 kolumny po prawej- próbki referencyjne).
Fig.3. The lateral surface of FML samples after ILSS tests (2 columns on the left- after conditioning, 2 columns on the right - the reference samples).



Rys.4. Wybrane krzywe dla kompozytu a) GFRP, b) CFRP oraz c) AIG i d) AIC wyznaczone w próbie zginania krótkiej belki.
Fig.4. Selected curves for the composite a) GFRP, b) CFRP and c) AIG i d) AIC set in the short beam bending test.

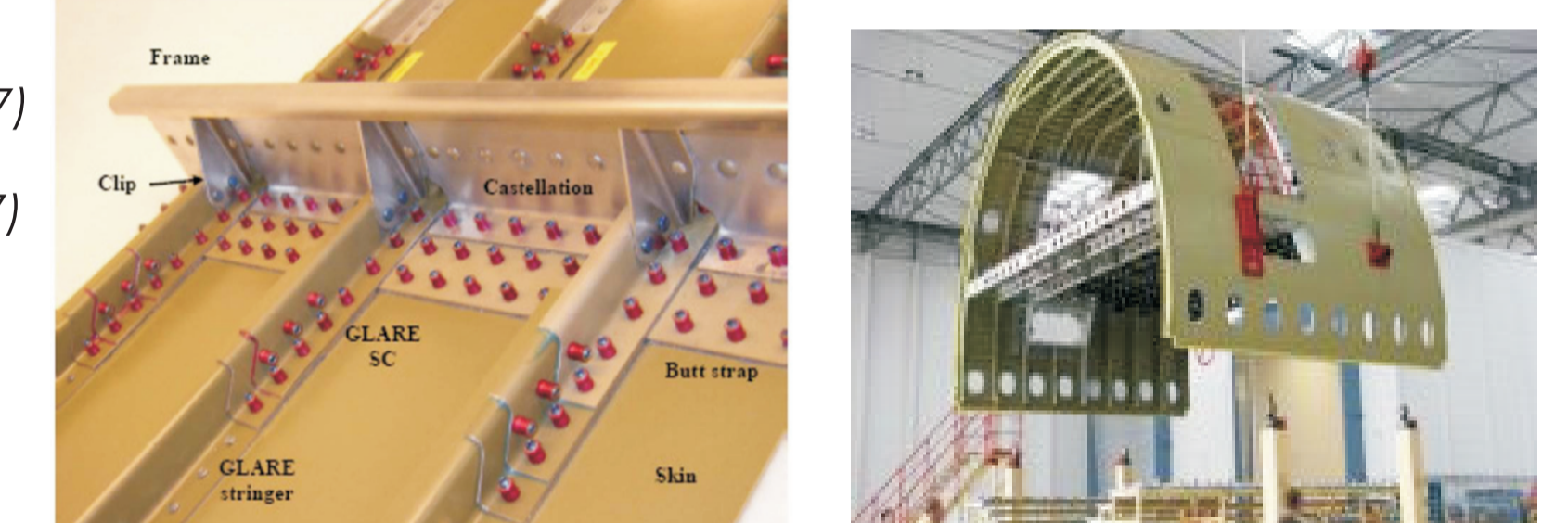
Wnioski Conclusions

Przeprowadzone badania wykazały, że:
- długotwale oddziaływanie czynników środowiskowych w postaci podwyższonej temperatury oraz wilgotności wpływa istotnie na właściwości mechaniczne badanych laminatów kompozytowych oraz laminatów metalowo-włóknistych.
- przeprowadzone próby saturacji maso próbki wykazały, że laminaty metalowo-włókniste są znacznie bardziej odporne na absorbowanie wilgoci z otoczenia. Związane jest to z występowaniem zewnętrznych warstw metalowych, które stanowią barierę dla procesu dyfuzji, która jest możliwa jedynie poprzez niezabezpieczone krawędzie laminatu.
- badania statycznej wytrzymałości na rozciąganie wskazują, że oddziaływanie czynników środowiskowych powoduje spadek wytrzymałości na rozciąganie, sztywności oraz odkształcenia przy zerwaniu badanych materiałów, przy czym spadek parametrów wytrzymałościowych zaobserwowanych dla laminatów metalowo-włóknistych jest relatywnie niższy.
- laminaty metalowo-włókniste jak i kompozyty polimerowe wzmocnione włóknami węglowymi oraz szklanymi, po ekspozycji na oddziaływanie podwyższonej temperatury i wilgotności odznaczały się niższymi wartościami wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe wyznaczonymi w próbie zginania krótkiej belki.

The study showed that:
- long-term of environmental factors in the form of elevated temperature and humidity have a significantly effect on the mechanical properties in tested polymer composites and FML.
- performed saturation weight of the sample showed that the FML's are much more resistant to absorption of ambient moisture. This is due to the presence of metal in outer layers so they are a barrier layer to the diffusion process, which is possible only through the unprotected edge of the laminate.
- Study the static tensile strength indicate that environmental factors causes a decrease in tensile strength, stiffness and break strain of test materials, and the decline strength parameters observed for the FML's is relatively lower.
- FML and polymer composites after exposure of elevated temperature and humidity were characterized by lower values in ILSS test.

Przykłady zastosowania w lotnictwie Examples of application in aviation

Rys.5. Laminaty FML w strukturach lotniczych (J. Sinke 2006, TU Delft 2007)
Fig.5. FML laminates in aircraft structures (J. Sinke 2006, TU Delft 2007)



Przykłady współpracy z przemysłem lotniczym Collaboration with aviation industry

- WSK PZL Świdnik S.A. - wykorzystanie metod oceny jakości struktur w przemyśle lotniczym; konsultacje naukowe dla pracowników zakładu w obszarze rozwoju technologii kompozytowych
- PZL Mielec - konsultacje w obszarze rozwoju technologii kompozytowych
- WSK PZL Świdnik S.A. - quality methods of assurance in aerospace structure, transfer of knowledge with factory employers about newest information of composites technology
- PZL Mielec - establishing cooperation in the area of composites technology.

Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

- Referaty**
- Bieniaś J., Jakubczak P., Surowska B., Dragan K.: **Oporność na uderzenia dynamiczne o niskiej energii i charakterystyka zniszczenia laminatów typu aluminium/włókno węglowe**. (Low-energy impact behaviour and damage characterization of carbon fiber reinforced aluminium hybrid laminates), XVIII Sympozjum Kompozyty- teoria i praktyka (Composites - Theory and Practice). Poraj, IV 2014
 - Surowska B., Majerski K., Bieniaś J.: **Wpływ czynników środowiskowych na właściwości mechaniczne laminatów metalowo-włóknistych**. (The influence of environmental conditioning on mechanical properties of fiber-metal laminates) XVIII Sympozjum Kompozyty- teoria i praktyka (Composites - Theory and Practice). Poraj, IV 2014
 - Surowska B., Majerski K., Bieniaś J., Kłosowski G.: **Mechanical behaviour of hygrothermal conditioned fiber metal laminates**, ECCM16, Sewilla VI 2014
 - Bieniaś J., Jakubczak P., Surowska B., Dębski H.: **Experimental and numerical investigation of low-velocity impact behavior of selected fibre metal laminates**, ECCM16, Sewilla VI 2014

- Prace mgr, dr, hab.**
Prace inżynierskie obronione:
- Plizga Paula: Analiza zniszczenia wybranych laminatów FML przy zastosowaniu technik wizualnych, opiekun prof. B. Surowska,
 - Praczyk Maja: Wpływ procesu korozji na właściwości wytrzymałościowe laminatów typu FML, opiekun prof. B. Surowska,
 - Rogała Karolina: Analiza wybranych wielkości fizycznych laminatów FML po uderzeniach dynamicznych o niskich prędkościach, opiekun prof. B. Surowska,

- Prace magisterskie obronione:**
- M.Kaczor: Wytwarzanie i struktura laminatów typu stop magnezu/kompozyt wzmocniany włóknami szklanymi i węglowymi opiekun dr inż. J. Bieniaś
 - A. Pozorski: Analiza zniszczenia laminatów metalowo-włóknistych po procesie zginania, opiekun dr inż. J. Bieniaś,
 - Ł. Sapijka: Badania korozyjne wybranych laminatów metalowo-włóknistych opiekun dr inż. J. Bieniaś,

- Prace magisterskie planowane**
- Pajurek M.: Analiza zniszczenia kompozytów w próbie zginania krótkiej belki, opiekun prof. B. Surowska, planowana obrona czerwiec 2014
 - Kłosowski G.: Wpływ warunków środowiskowych na poziom wytrzymałości na ścinanie międzywarstwowe laminatów metalowo-włóknistych, opiekun prof. B. Surowska, planowana obrona czerwiec 2014
 - Laskowski P.: Badania stanu warstwy wierzchniej tytanu do zastosowania w laminatach FML, opiekun dr J. Bieniaś, planowana obrona czerwiec 2014
 - Zagrabła D.: Dobór komponentów do wytwarzania laminatów typu tytan/kompozyt, opiekun dr J. Bieniaś, planowana obrona czerwiec 2014

- Prace doktorskie**
Tytuł: **Rola mikrostruktury warstwy wierzchniej aluminium w kształtowaniu właściwości laminatu aluminium-kompozyt epoksydowo-szklany**,
Autor: Monika Ostapiuk, promotor: prof. dr hab, Surowska Barbara
Status: w recenzjach

- Tytuł: **Analiza zniszczenia laminatów metalowo-włóknistych w wyniku obciążenia dynamicznego z niską prędkością**
Autor: Patryk Jakubczak, promotor: prof. dr hab. Surowska Barbara
Status: w przygotowaniu
- Zgłoszenia patentowe**
- P.407200 pt. Laminat metalowo-polimerowy (PL)
 - P.407201 pt. Laminat metalowo-polimerowy (PL)
 - P.407202 pt. Laminat metalowo-polimerowy (PL)
 - P.407557 pt. Sposób wytwarzania laminatu aluminium - węgiel - aluminium i laminat typu aluminium - węgiel - aluminium (PL)
 - P.408182 pt. Uchwyt do badań wytrzymałościowych (PL)