Silesian University of Technology

RESEARCH UNIVERSITY
EXCELLENCE INITIATIVE
Ministry of Science and Higher Education

Wyzwania w zakresie inżynierii materiałowej w obszarze rozwoju sprzętu wojskowego

Arkadiusz Mężyk
Centrum Technologii Obronnych i podwójnego zastosowania TOPAZ

20.09.2026

Każdy konflikt zbrojny niesie nowe wyzwania - wnioski z wojny na Ukrainie

- Coraz więcej operacji **wojskowych i logistycznych** przeprowadzanych jest z wykorzystaniem **dronów i bezzałogowych pojazdów lądowych**
- **Gwałtowny rozwój technologii środków napadu powietrznego**
- Praktycznie **nie prowadzi się obecnie większych działań z udziałem ciężkich pojazdów pancernych, operacje powietrzne zdominowały działania bojowe**
- **Technologie satelitarne** w dziedzinie łączności, nawigacji i rozpoznania dominują na współczesnym polu walki
- Nastąpił gwałtowny **rozwój walki elektronicznej**, szczególnie w wykrywaniu i zakłócaniu sygnałów elektromagnetycznych oraz nawigacji satelitarnej
- Rozwijane są **lądowe i morskie systemy robotyki wojskowej**
- **Rozwój zastosowań systemów AI**
- Istotnym elementem zwiększania przeżywalności stają się **środki zmniejszające sygnatury** obiektów
- Kluczowa stała się **rola zapór fizycznych, umocnień oraz schronień** dla żołnierzy i ludności cywilnej oraz infrastruktury technicznej


Źródło zdjęć: facebook

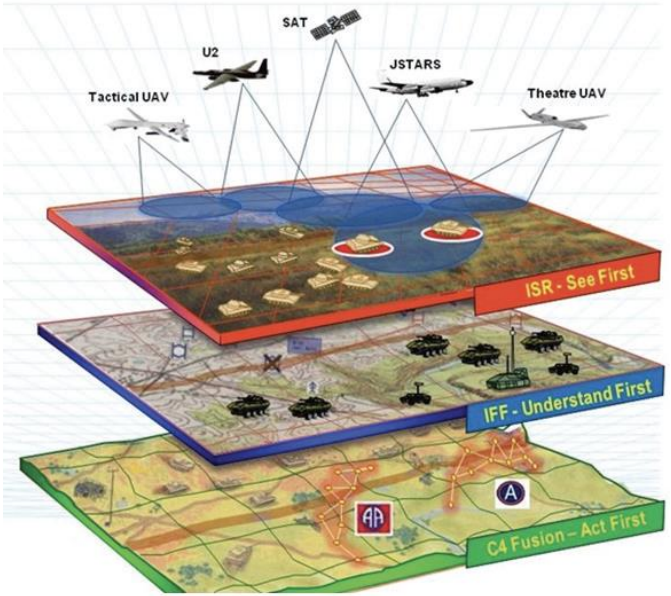

Źródło zdjęć: © ICEYE


Źródło zdjęć: © Telegram | 7 корпус ДШВ

Operacje wielodomenowe

Domena:

1. przestrzeni kosmicznej
2. powietrzna
3. lądowa
4. morska
5. cyberprzestrzeni



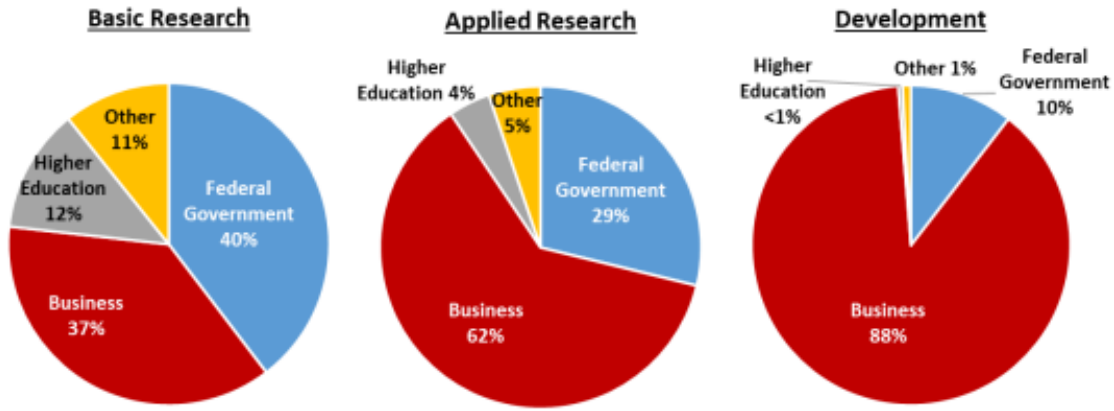
Źródło:
https://www.act.nato.int/activities/multi-domain-operations/

Defence Science Journal, Vol. 67, No. 4, July 2017,

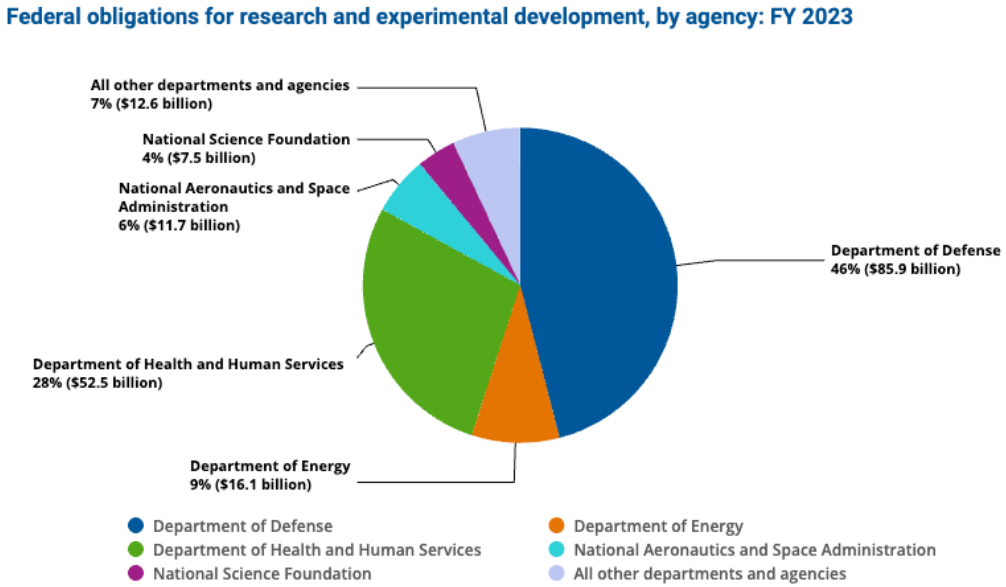
Finansowanie kluczowych badań i rozwoju w USA

- **Do niedawna rząd USA pozostawał zdecydowanie największym fundatorem postępu naukowego**, oprócz finansowania własnych laboratoriów i infrastruktury badawczej.
- **W 2023 roku** kwota dla programów badawczych szkolnictwa wyższego wyniosła **prawie 60 miliardów USD z 109 miliardów USD wydanych na nauki podstawowe i inżynieryjne**.
- **W roku budżetowym 2027** prezydent Trump planuje ograniczyć budżet na naukę, jednocześnie **zwiększając wydatki na badania stosowane w obszarach obrony, energii, sztucznej inteligencji i technologii kwantowych**.

Polska na badania i rozwój przeznaczyła z budżetu obronnego:
w 2025 roku kwotę 1,335 mld PLN, a w 2026 tylko 1,019 mld PLN



Source: CRS analysis of National Science Foundation, *National Patterns of R&D Resources:* ***2021-2022 Data Update***, NSF 24-318, Tables 7-9, January, 2024.



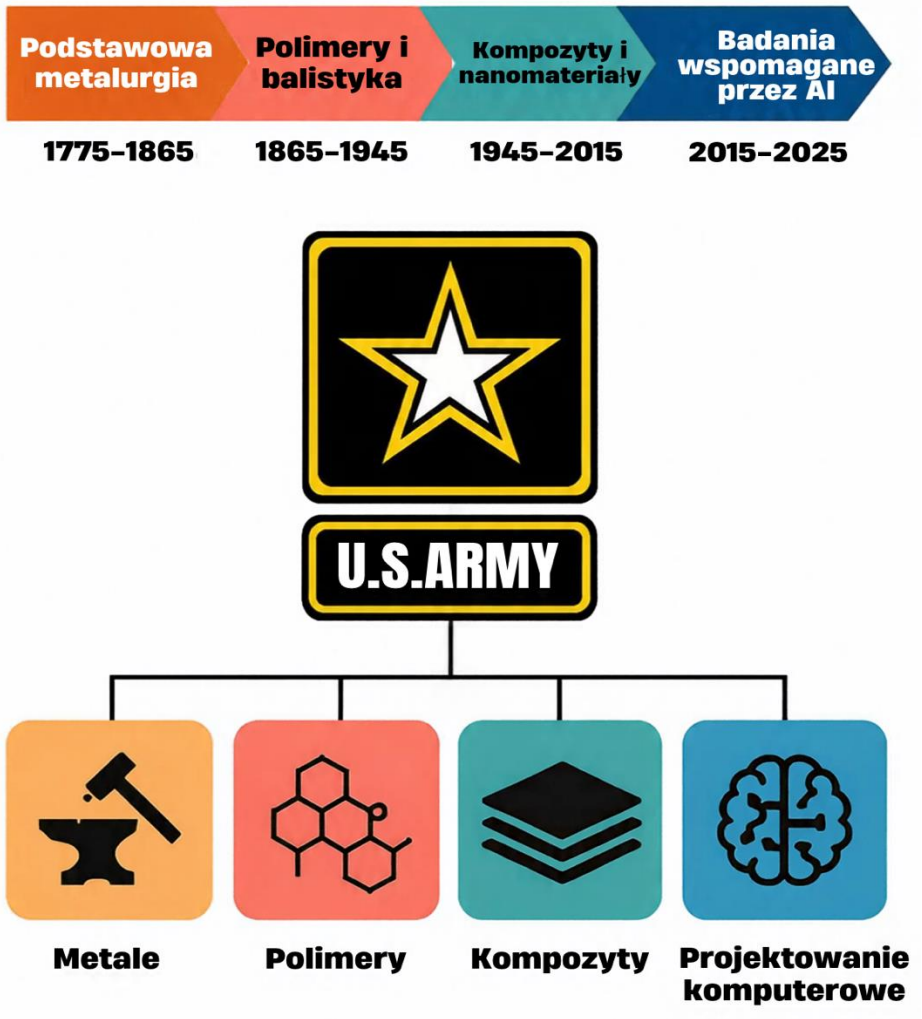
National Center for Science and Engineering Statistics, Survey of Federal Funds for Research and Development, **FYs 2023–24**.

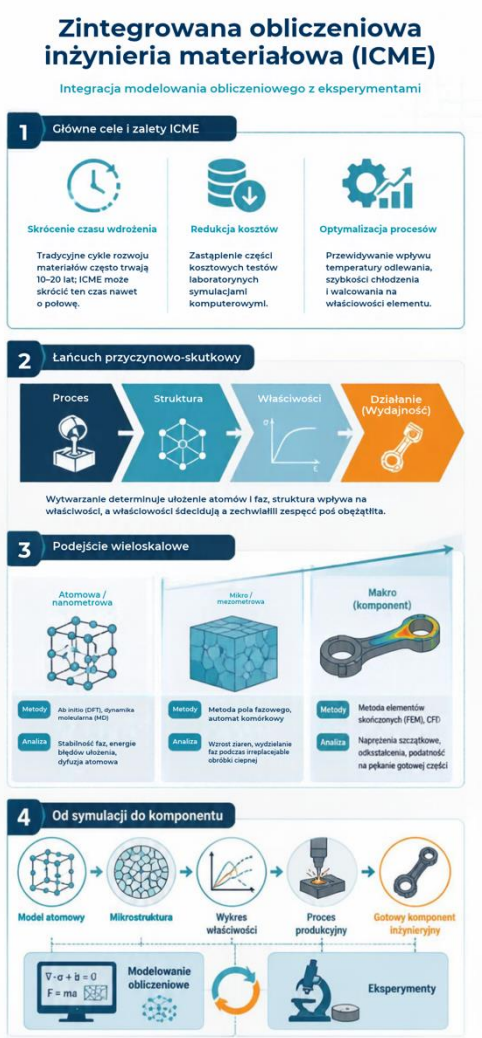
Rozwój kluczowych badań wojskowych w USA na przestrzeni 250 lat

Lata	Osiągnięcia badawcze i wdrożeniowe
1775–1865	Wymienne części sprzętu wojskowego; standardy metalurgiczne w zakładach produkcyjnych; wczesna chemia materiałów pędnych
1865–1918	Stale pancerne; proch bezdymny; prekursory polimerów
1918–1945	Nauka o balistyce; mechanika pękania; polimery syntetyczne; materiały dla elektroniki
1945–1975	RHA; **pancerz ceramiczny; włókna aramidowe**; energetyka; **materiały noktowizyjne**
1975–2000	**Pancerz UHMWPE** (polietylen o ultra wysokiej masie cząsteczkowej); **kompozyty z włókna węglowego; mikroelektronika**
2000–2015	**Materiały nanostrukturalne; zintegrowana obliczeniowa inżynieria materiałowa ICME;** Bezpieczeństwo akumulatorów litowo-jonowych; **Produkcja addytywna**
2015–2025	Odkrycia wspierane zastosowaniem sztucznej inteligencji; **stopy o wysokiej entropii HEA; ceramika ultra wysokotemperaturowa UHTC; materiały kwantowe;** zrównoważone materiały wysokoenergetyczne

ACS Appl. Mater. Interfaces. 2026;18(4):6265-6270. doi:10.1021/acsami.5c24495

Rozwój kluczowych badań naukowych przez armię USA





Projektowanie materiałów z wykorzystaniem sztucznej inteligencji

Sztuczna inteligencja już zrewolucjonizowała projektowanie materiałów we wszystkich obszarach badań wojskowych w USA.

Modele uczenia maszynowego trenowane na historycznych zbiorach danych przyspieszają przewidywanie właściwości stopów, wytrzymałości ceramiki, wydajności polimerów i wrażliwości energetycznej materiałów.

ACS Appl. Mater. Interfaces. 2026;18(4):6265-6270.
doi:10.1021/acsami.5c24495

Wybrane obszary rozwoju inżynierii materiałowej w kraju

- Cyberbezpieczeństwo i kryptografia (technologie kwantowe)
- Bezpieczne systemy komunikacji, interoperacyjność
- Technologie rozpoznania i satelitarne
- Drony i inne pojazdy bezzałogowe
- Technologie addytywne
- Infrastruktura krytyczna i schronienia
- Indywidualny sprzęt żołnierzy, tekstronika
- Materiały o wysokiej energii i amunicja krążąca
- Ciężkie i lekkie pojazdy opancerzone, artyleria samobieżna
- Blachy pancerne, osłony balistyczne, ceramika, kompozyty oraz inne nowoczesne materiały i technologie



Źródło: Centrum Kompetencji Połączonych Sił Powietrznych NATO

Kluczowe zdolności w zakresie sprzętu wojsk lądowych

Masa pojazdu determinuje jego podstawowe zdolności (blisko 70% masy czołgu to kadłub, wieża i układ jezdny)



Przeżywalność pojazdu – warstwy ochrony



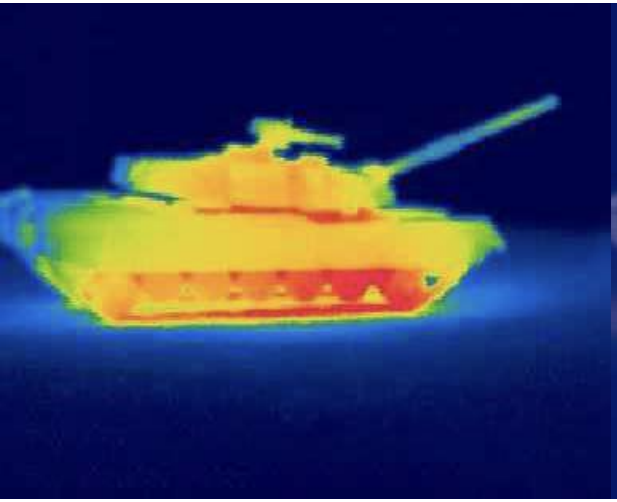
Kamuflaż multispektralny (np. polski Berberys), **powłoki absorbujące fale radarowe** (RAM), **obniżanie sygnatury termicznej**.

granaty dymne zakłócające laser/termowizję

Pancerz zasadniczy (kompozytowy lub warstwowy), moduły pancerza reaktywnego (ERA, np. Kostakt-5, ERAWA), pancerz prętowy/klatkowy przeciw dronom FPV.

Wewnętrzne wykładziny przeciwodłamkowe (spall-liners), automatyczne systemy przeciwwybuchowe i przeciwpożarowe, **kamizelki kuloodporne**, **hełmy**

Sygnatura pojazdu, farby, folie, nakrycia multispektralne



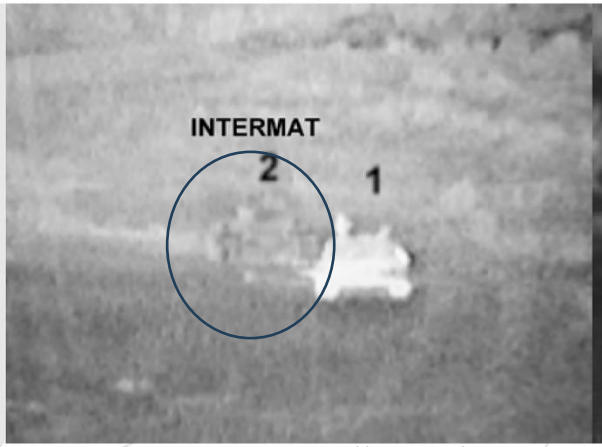


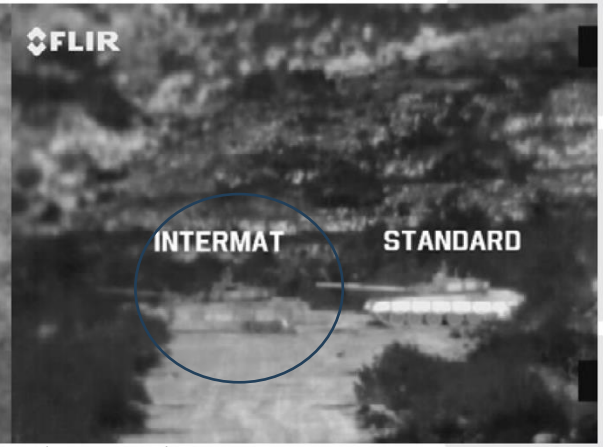






ATGS-17 VERSUS STANDARD SUIT
OBERVATION BY NIGHT VISION GOGGLES (NVGs)

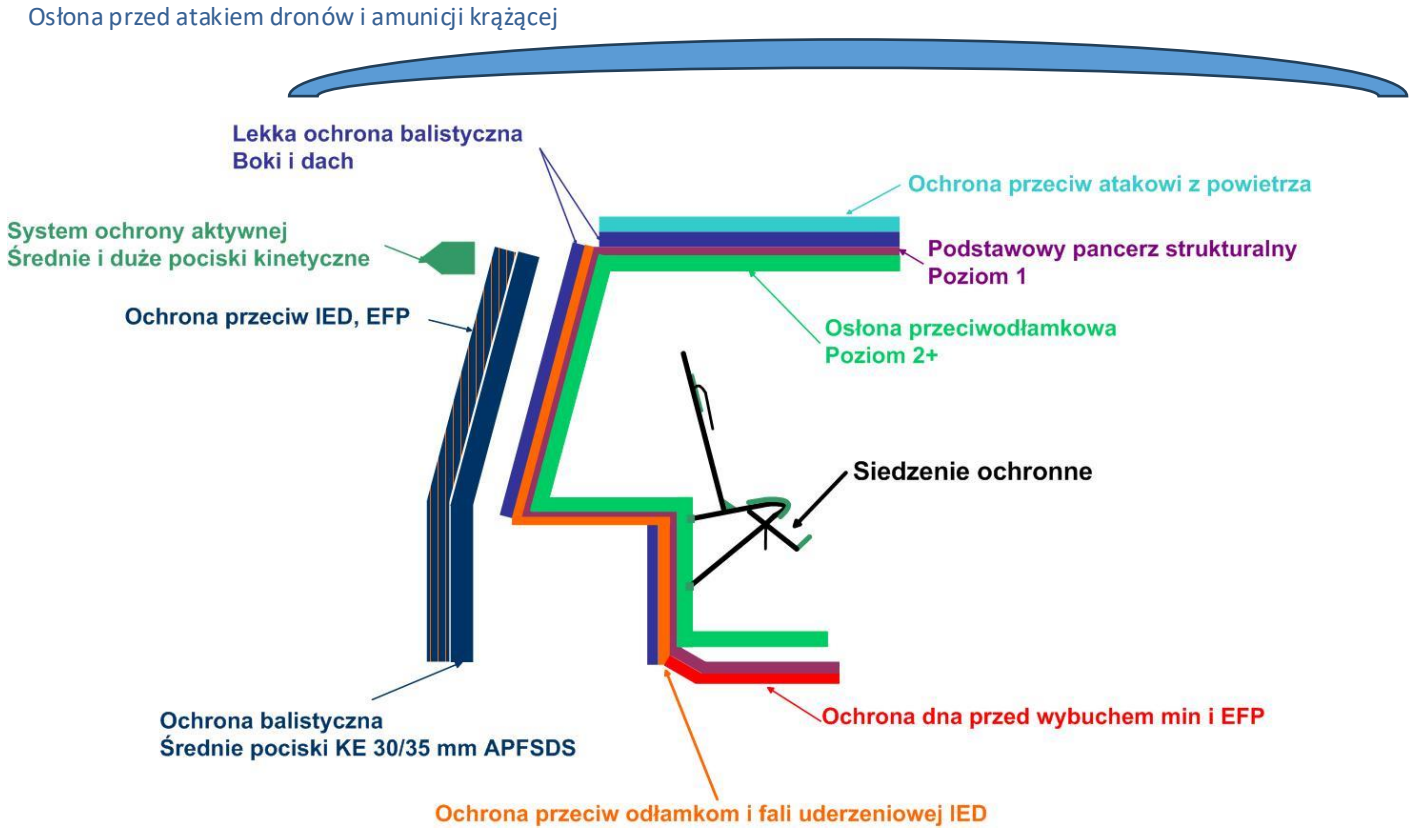






https://cdn.sec.gr/datafiles-intermat/content-files/cmiq405208302258038998b48.pdf

Osłony balistyczne lekkich pojazdów



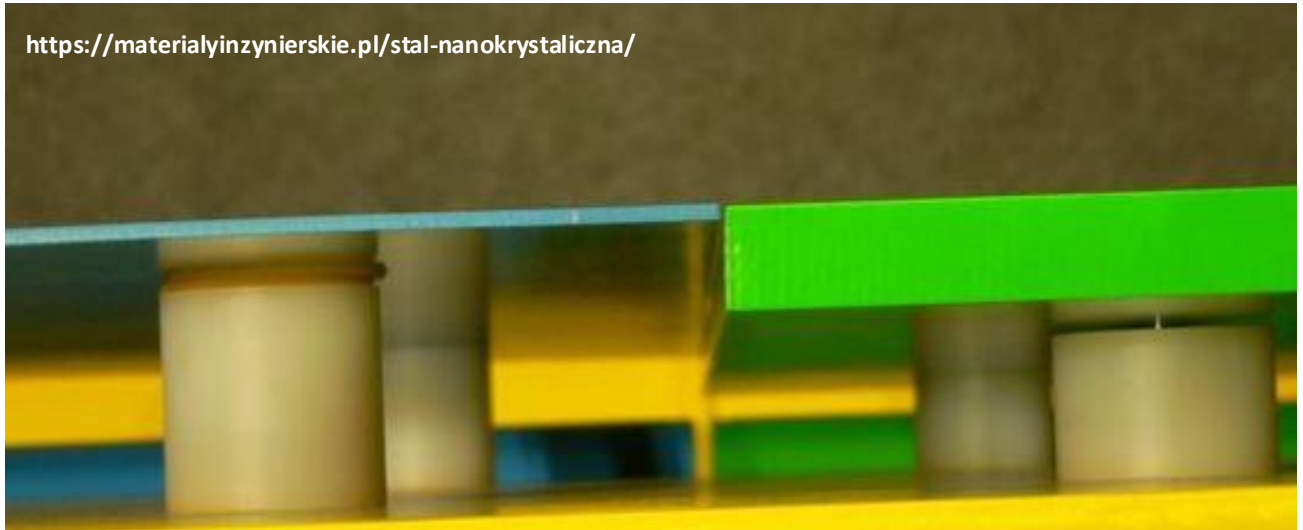
System dodatkowych osłon pancerza pojazdu lądowego



Badanie odporności na wielokrotne trafienia pancerza ze stali wykonanej w nanotechnologii - po lewej stronie oraz pancernej RHA - po prawej stronie

https://www.army-guide.com/eng/article/article_1723.html

Osłony balistyczne pojazdów opancerzonych



Porównanie dwóch płyt opancerzenia. Po lewej płyta ze stali nanokrystalicznej, po prawej nanoceramika. Fot: Aaron Rokosz



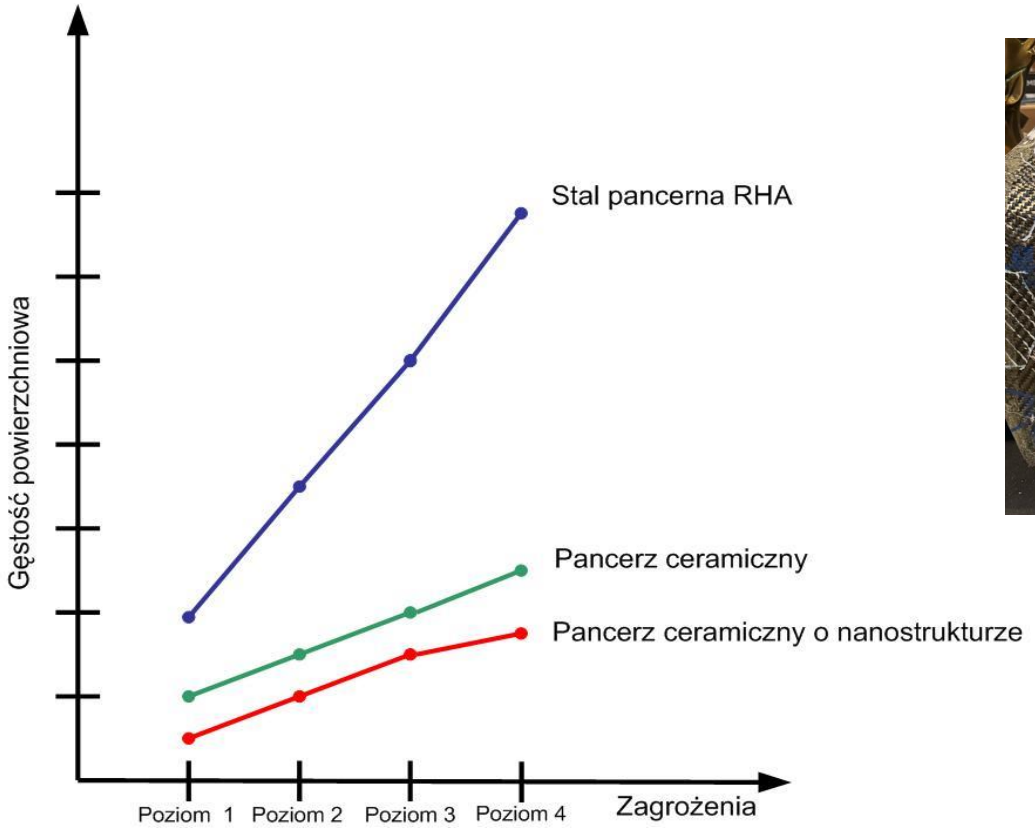
Japoński czołg Typ 10 z opancerzeniem wykonanje ze stali nanokrystalicznej (masa bojowa 48t)

- **Opancerzenie** dodatkowe KTO Rosomak wykonane **ze stali nanokrystalicznej** pozwala **zredukować masę o ok. 35%** w porównaniu do pancerza tradycyjnego.
- **Opancerzenie z nanoceramiki** umożliwia **redukcję masy o ok. 47%.**
- **Wprowadzenie nowych typów pojazdów w siłach zbrojnych wymagać będzie opracowania nowych typów osłon balistycznych dostosowanych do wymogów przyszłego pola walki.**
- **W przyszłych pojazdach** rozważa się m.in. stosowanie zaawansowanych systemów monitorowania **HUMS** oraz nowych typów **materiałów samonaprawiających się.**

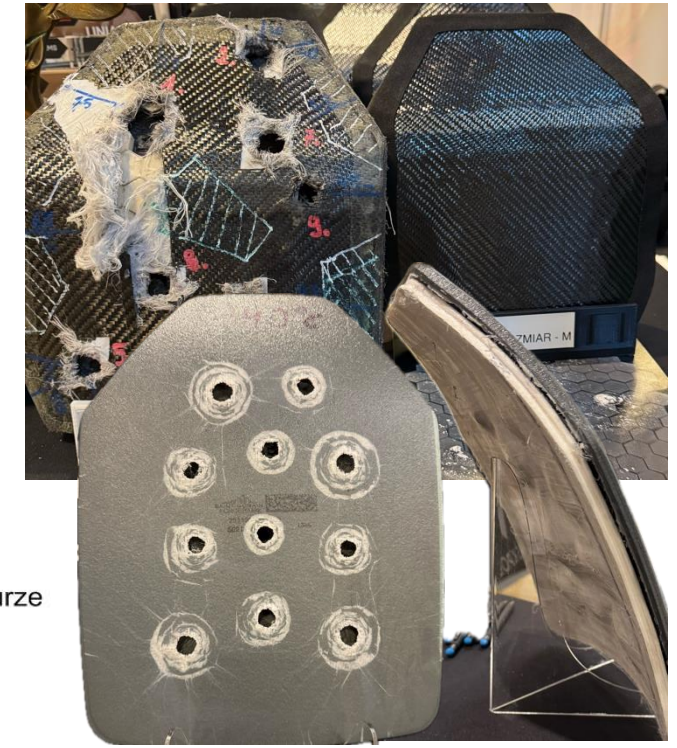
Osobiste osłony typu stealth oraz balistyczne



https://intermatdefense.com/anti-thermal-ir-cloak-suits



https://www.army-guide.com/eng/article/article_1723.html



Porównanie jednostkowej masy opancerzenia ze stali pancernej RHA, pancerza ceramicznego i nano ceramicznego w zależności od poziomu ochrony balistycznej (STANAG 4569)

Projektowanie schronów i ukryć



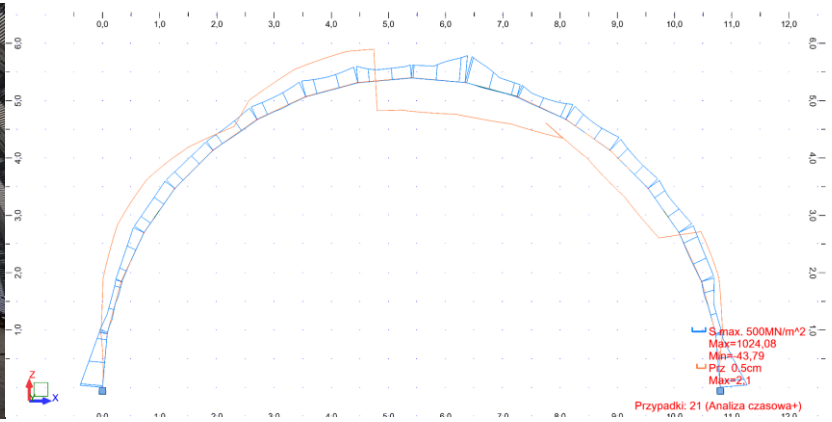
Badania balistyczne we współpracy z Zespołem badawczym dynamiki i modelowania Politechniki Wrocławskiej

- Beton odporny na falę uderzeniową
- Beton balistyczny i fibrobeton (UHPC/UHPFRC)
- Beton osłonowy (NBC / promieniowanie)
- Beton ognioodporny
- Beton szybkotwardniejący
- Beton o obniżonej sygnaturze









Innowacje materiałowe rozwijane w XXI wieku

Produkcja addytywna i metalurgia wspomagana cyfrowo

- Umożliwia naprawy, tworzenie powłok i wzmocnienia strukturalne, których nie da się osiągnąć przy użyciu konwencjonalnej produkcji.
- Ekspedycyjne wytwarzanie addytywne (AM) pozostaje głównym kierunkiem badań, mającym na celu umożliwienie produkcji i naprawy części w trudnych warunkach.

Nowoczesna ceramika, nanoceramika, ceramika ultra wysokotemperaturowa (UHTC) i ceramika o wysokiej entropii

- Wymagania związane z lotami hipersonicznymi i zaawansowanymi systemami ochrony
- Materiały odporne na ekstremalne temperatury, utlenianie i szok termiczny.
- Ceramika o wysokiej entropii stała się obiecującym materiałem ze względu na powolną dyfuzję i regulowane właściwości mechaniczne.

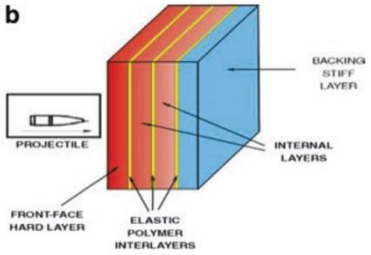
Stopy o wysokiej entropii i zaawansowane technologie metali

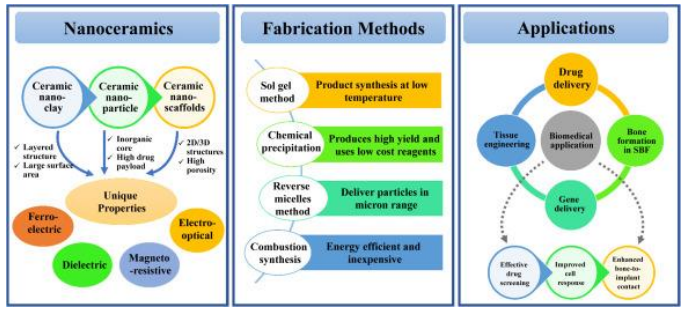
- Powolna kinetyka dyfuzji i złożona stabilność fazowa HEA sprawiają, że są one obiecującymi kandydatami na tuleje luf armatnich, komponenty o wysokiej odporności na zużycie oraz systemy ochrony termicznej w środowiskach o dużej prędkości.

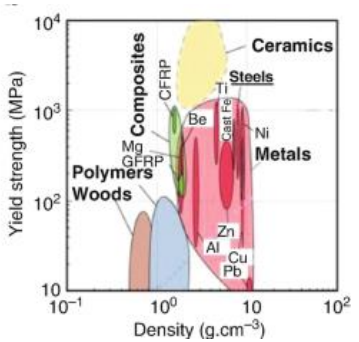
Polimery, wyposażenie żołnierza i materiały wielofunkcyjne

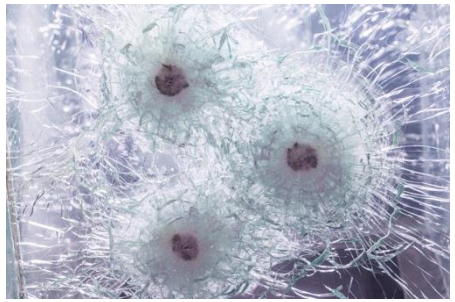
- Wielofunkcyjność, w tym absorpcja energii, wykrywanie**, samonaprawianie** i integrację z systemami elektronicznymi.
- Materiały **elastomerowe o kontrolowanym zachowaniu lepkosprężystym**, z lepszą ochroną przed wybuchami, sieci mikronaczyniowe umożliwiają samonaprawę uszkodzeń.
- Elastyczne podłoża polimerowe i przewodzące włókna umożliwiają rozwój anten noszonych przez żołnierzy, czujników fizjologicznych i zintegrowanych systemów zasilania.







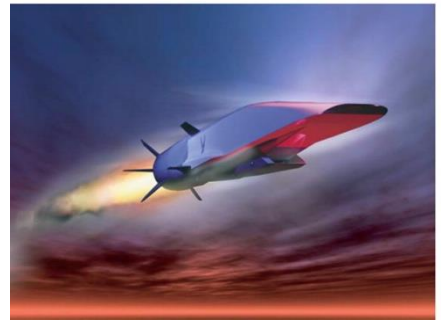




[Industrial Applications of Nanoceramics](#) Micro and Nano Technologies 2024, Pages 19-36, Chapter 2 - Nanoceramics: fabrication, properties, and applications,

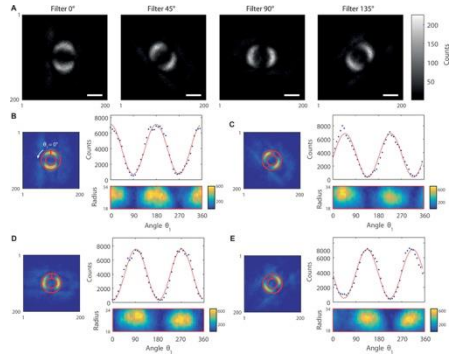
https://precisionballistics.co.uk/ballistic-testing/transparent-armour/

Perspektywiczne obszary nauki o materiałach rozwijane przez wojsko



Materiały dla systemów hipersonicznych i środowisk ekstremalnych

- Niespotykane dotąd warunki termiczne, mechaniczne i chemiczne.
- Ulepszone powłoki UHTC, kompozyty oraz powłoki wielofunkcyjne, odporne na utlenianie, ablację i szok termiczny w temperaturach przekraczających 3000°C.
- Wyzwaniem jest zrozumienie oddziaływań plazmy, rekombinacji katalitycznej oraz sprzężenia między naprężeniami termicznymi i mechanicznymi



Materiały dla systemów kwantowych i fotoniczne

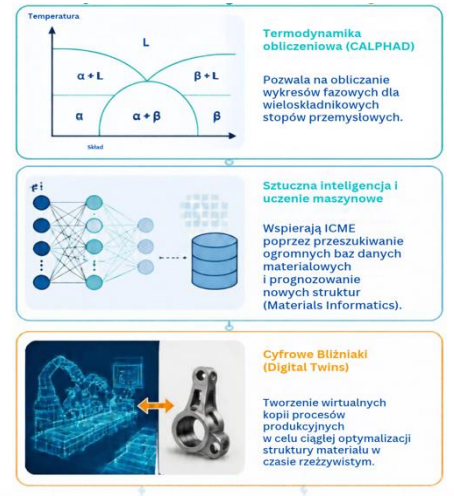
- Systemy kwantowe wymagają materiałów o kontrolowanej populacji defektów, długich czasach koherencji i wysokiej jakości optycznej.
- Optymalizacja półprzewodników szerokopasmowych oraz struktur kryształów fotonicznych, które umożliwiają **czułą magnetometrię, precyzyjną nawigację i bezpieczną komunikację.**
- Materiały odporne na promieniowanie i kriogeniczne niezbędne dla przyszłych systemów czujników wojskowych.

Materiały wysokoenergetyczne - zrównoważone i niewrażliwe

- Rozwój materiałów, które **minimalizują niebezpieczne produkty uboczne i poprawiają długoterminową stabilność**.
- Synteza mechanochemiczna, odnawialne surowce, spoiwa nadające się do recyklingu oraz predykcyjne modelowanie procesów rozkładu.
- Produkcja amunicji odpornej na uszkodzenia, która zmniejsza podatność na uszkodzenia podczas obsługi, przechowywania i transportu.

Zintegrowana obliczeniowa inżynieria materiałowa (ICME)

- Integracja baz danych termodynamicznych, grafów wiedzy, modeli uczenia maszynowego, narzędzi autonomicznych i symulacji wieloskalowych.
- W pełni cyfrowe ekosystemy materiałowe umożliwią projektowanie predykcyjne, szybką syntezę, modelowanie cyklu życia i ciągłą optymalizację materiałów w trakcie eksploatacji. Będzie to szczególnie ważne w rozwoju lekkich materiałów wielofunkcyjnych.



https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1359646216305139-fx1_lrg.jpg
https://i0.wp.com/mobirank.pl/wp-content/uploads/2019/07/splatanie-kwantowe.jpg?ssl=1

Podsumowanie

- W okresie ostatnich 50 lat obserwujemy gwałtowny rozwój inżynierii materiałowej w zastosowaniach wojskowych
- Prowadzone obecnie konflikty zbrojne i rozwój technologiczny przyczyniają się do przyspieszenia rozwoju badań naukowych, w tym z zakresu inżynierii materiałowej
- Najbliższe lata stanowić będą nowy etap projektowania zaawansowanych materiałów wspomagany sztuczną inteligencją i zintegrowanymi systemami obliczeniowymi
- Użytkowany sprzęt wojskowy w swoim cyklu życia wymaga także regularnych modernizacji z wykorzystaniem najnowszych osiągnięć inżynierii materiałowej, szczególnie w zakresie zwiększenia przeżywalności



Dziękuję za uwagę!

Centrum Technologii Obronnych i Podwójnego Zastosowania TOPAZ

Konarskiego 18A, pok. 182

44-100 Gliwice

tel.: 32 237-16-46

email: topaz@polsl.pl