

НАНОТЕХНОЛОШКИ РАЗВОЈ АМЕРИЧКИХ ВОЈНИХ СПОСОБНОСТИ У 21. ВЕКУ*

Срђан Т. Кораћ¹

Достављен: 04.12.2024.

Језик рада: Српски

Кориговано: 27.02.2025.

Тип рада: прегледни рад

Прихваћен: 11.03.2025.

DOI број: 10.5937/vojdelo2404081K

Рад разматра јавно доступна научна достигнућа и техничко-технолошке иновације у области нанотехнологија у контексту осавремењивања војних способности САД. Полази се од претпоставке да је стварање софистицираних војних способности, лоцираних у дометима Четврте индустријске револуције, виталан гарант одрживе војне моћи у 21. веку, односно успешног глобалног пројектовања оружане силе као средства очувања светске хегемоније. Анализа је усредсређена на остварена и очекивана достигнућа са потенцијалом за војну примену, проистекла из јавно доступних основних и примењених нанотехнолошких научних и развојних пројеката обухваћених одбрамбеним буџетом, као и на достигнућа представљена у научној и стручној литератури. Достигнућа су сагледана у следећим пољима: напредни материјали, експлозиви и њихови детектори, нанодронов и нанороботи, микросателити и војник-киборг. Закључује се да будућа употребна вредност достигнућа нанотехнолошког развоја за војне сврхе може бити ограничена проблемима функционалног уклапања софистицираних решења у војностратејски, оперативни и тактички оквир, па технолошки „скок“ не мора нужно да се преточи у већу делотворност војних способности на бојишту.

Кључне речи: *нанотехнологије, наоружање, ратовање, одбрамбена политика, војска, Оружане снаге САД.*

Будућност ратовања није истоветна будућим технологијама,
али ратовање увек поседује технолошку димензију.

Колин Греј
(Gray, 2005: 98)

* Рад је настао у оквиру Плана научноистраживачке делатности за 2024. годину Института за политичке студије у Београду, који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

¹ Институт за политичке студије, Београд, Република Србија, Е-mail: srdjan.korac@ips.ac.rs, <https://orcid.org/0000-0003-0722-6419>.

Будућност ратовања у огледалу технолошких „скокова“

Основна идеја водилца ратних вођа у подстицању војнотехнолошких „скокова“ била је проналазак нових борбених средстава и осмишљавање пратеће тактике како би се непријатељ победио уз најмање сопствене жртве (Creveld, 2000; Хауард, 1999). Убрзан научно-технолошки напредак и индустријализација отворили су у 19. и почетком 20. века ново поглавље у ратној историји у виду драматичних техничких побољшања: наоружање је постало далекометније, прецизније и разорније. Први светски рат је у једном научном часопису 1918. године са правом назван „ратом инжењера“ и зачетком процеса систематичног повезивања технологије, индустрије, науке и војног планирања (Mills & Mills, 2014: 3, 10, 12–20). Тај процес је одиграо пресудну улогу током Другог светског рата (Хауард, 1999: 165–190), а војна индустрија је у послератном периоду прерасла у нову грану привреде, те постала профитабилан извозник на светско тржиште и легитимни носилац економског раста. Улазак у информатичко доба подстакао је талас корених промена у војној организацији, стратешком размишљању и начину вођења рата, обухваћених синтагмом „револуција војних послова“ (*Revolution in Military Affairs*), и то са концептом мрежноцентричног ратовања (*network-centric warfare*) као окосницом целокупних реформи (Костић, 2008; Хаукрофт, 2008; Dahl, 2002). Увођење револуције војних послова у савремени канон војне мисли и праксе створило је уверење да је, у околностима несврсисходности употребе нуклеарног оружја и смањења значаја пуке бројчане надмоћи, потребно начинити квалитативан искорак у развоју конвенционалних војних способности, и то у виду овладавања напредним технологијама које се појављују на друштвеном хоризонту (Cohen, 1996; Dombrowski & Gholz, 2006: 5–6; Krepinevich & Watts, 2014: 193–226).

Императив преображаја ради прилагођавања брзини и природи спољних промена у окружењу стално је обележје сваке организације која жели да успешно остварује задате циљеве (Charan, 2022), па тако и савремених оружаних снага. Које се то промене глобалног окружења одвијају у раном 21. веку, а да захтевају брзу модернизацију америчке војске? Према проценама спољнополитичких одлучилаца из Вашингтона и оцена садржаних у научној и стручној литератури из области међународних односа, друга и трећа декада текућег века могле би да донесу крупне потресе у виду оспоравања међународних норми, постојаног урушавања демократског поретка и прекомпоновања међународног система (Janković & Mitić, 2024; Kostić, 2018: 397–407). Студија о основним трендовима који ће обликовати међународне сукобе око 2030. године и последицама по америчку спољну и одбрамбену политику, а коју је 2020. године израдила Корпорација RAND (*RAND Corporation*), иначе веома утицајна у вашингтонском естаблишменту, упозорава политичке одлучиоце на постепену али континуирану ерозију квантитативних и квалитативних елемената вишедеценијске војне надмоћи САД. Аутори студије напомињу да је континуирано смањење величине конвенционалних оружаних снага САД довело до постепеног губитка предности

над ривалима, првенствено над Кином, а посебно у погледу улагања у модернизацију војних капацитета (Cohen et al., 2020: 54–62). Због тога је, према оценама те студије, веома важно да САД одрже војну индустрију, смањену током протекле две деценије, на нивоу неопходном за несметан развој и производњу иновативних оружаних система заснованих на напредним технологијама (Cohen et al., 2020: 60–62).

Успешан исход дугорочног систематског увезивања програма научног истраживања и техничко-технолошког развоја у војне сврхе на универзитетима и у корпоративном свету видљив је управо у очувању америчке војнотехнолошке виталности и на почетку 21. века (Guzzetti, 2010; Dombrowski & Gholz, 2006). Америчка Стратегија националне безбедности од 2022. године (*The 2022 National Security Strategy*) препознаје технологију као средишњи чинилац геополитичког такмичења у међународној арили, те тиме и очувања и унапређења националне безбедности кроз одвраћање у виду војног преимућства заснованог на улагањима у иновације и напредне технологије Четврте индустријске револуције (NSS, 2022: 32–34). Због тога америчка Стратегија националне одбране (*The 2022 National Defense Strategy*), усвојена у октобру 2022. године, предвиђа ослањање на примену нових напредних технологија у процесу модернизације оружаних снага усмерене на стварање одвраћајућег и оперативног преимућства над непријатељским снагама, што би требало да буде остварено кроз садејство свих релевантних државних органа са предузетничким потенцијалом приватног сектора и креативним и иновативним потенцијалом научне заједнице (NDS, 2022: 17, 19). У настојању да што делотворније одговори на измењене оперативне изазове улагањем у војну индустрију и цивилни сектор привреде ради проналажења технолошких решења, Пентагон се опредељује за приступ брзог препознавања идеја које највише обећавају, експериментисања са прототиповима, израде и увођења коначне верзије производа у борбене операције (NDS, 2022: 19). И Стратегија за науку и технологију у подручју националне одбране (*National Defense Science and Technology Strategy 2023*) наглашава важност одржања технолошке надмоћи САД и чланица НАТО-а над другим великим силама (првенствено Кином) као виталних предуслова за остварење стратешких циљева националне безбедности (NDSTS, 2023: 3–4, 9). Слични приоритети се наводе и у Стратегији за модернизацију војске за 2019. годину (AMS 2019, 2018: 8–9), као оквиру који разрађује реформске циљеве орочене на 2035. годину.

Окосницу развоја америчких оружаних снага у 21. веку – дефинисаног документом Здружена визија 2020. (*Joint Vision 2020*) и трасираног документима Војска 2030. године (*Army of 2030*), Стратегија војске (*The Army Strategy*) и Визија војске за 2028. годину (*The Army Vision for 2028*) – чини средишња идеја тзв. западног начина ратовања, ослоњеног на максимализацију високотехнолошких способности ради минимизирања људских жртава – једнако цивилних и војних (Joint Vision 2020, 2000; The Army Strategy, 2018; The Army Vision for 2028, 2018; Army of 2030, 2022). Према наведеним документима, модернизација треба да учини америчку војску флексибилнијом, прилагодљивијом и агилнијом за брзо размештање трупа и вођење сложених борбених операција широм планете, и то у сукобима и високог и ниског интензитета. Студија о прилагођавању капацита-

тета, оперативне методологије и буџета америчких оружаних снага измењеној природи потенцијалних глобалних одбрамбених изазова очекиваних у периоду до 2035. године, под називом Окружење здруженог дејства 2035. године (*Joint Operating Environment 2035*), упозорава на велику вероватноћу од угрожавања америчких глобалних интереса услед постепеног успостављања технолошког паритета између САД и осталих (потенцијално непријатељских) великих сила (JOE 2035, 2016: 15). Налази студије препоручују преобликовање војске тако да буде способна да једнако делотворно одговори на иновативну непријатељску примену напредних и конвенционалних технологија, где год да је принуђена да пројектује оружану силу (JOE 2035, 2016: 15). Поред роботике, биологије, енергије и информационе технологије, документ препознаје нанотехнологије као области са високим степеном пројектованог позитивног утицаја основних истраживања на модернизацију војних капацитета, посебно у домену развоја метаматеријала, инжењерске модификације структурних одлика материјала на нано-нивоу и наносателита (JOE 2035, 2016: 16).

У наставку рада биће представљен преглед могућих праваца развоја и прилагођавања нанотехнологија у војне сврхе кроз анализу релевантних јавно доступних пројеката обухваћених одбрамбеним буџетом и пратеће научне и стручне литературе. Сједињене Државе су одабране као случај за анализу из три разлога. Прво, без обзира на домете кинеске, руске и иранске науке и технологије у служби одбрамбене политике у протекле две декаде (нпр. оснивање специјализованих владиних развојних организација и јачање сарадње између науке, привреде и војске у домену нанотехнологија), САД успевају да одрже водећу улогу у померању граница у нанотехнологијама (Dong et al., 2016; Del Monte, 2017: 194–203). Друго, реч је о војној сили која, као предводница НАТО-а, представља узор осталим земљама западног цивилизацијског круга у погледу стратешког, доктринарног и организационог уобличавања војске у 21. веку. Пентагон и национална министарства одбране земаља чланица тог војног савеза – превасходно Велике Британије, Француске и Немачке – размењују знања и спроводе заједничке пројекте у домену нанотехнологија и наоружања заснованог на тим технологијама (Del Monte, 2017: 200–201). Треће, званична документа о развојним правцима на пољу нанотехнологија и плановима за њену војну примену јавно су доступна.

Нанотехнолошки нормативно-институционални оквир развоја војних способности САД

Према деценију и по старим предвиђањима футуролога Џејмса Кантона (James Cantor), утицајног и у политичким круговима у својству вишедеценијског саветника Беле куће, производи засновани на нанотехнологијама имају улогу једног од четири покретача иновацијске привреде у глобалним размерама (Cantor, 2009: 104–105), са потенцијалом да покрену нову индустријску револуцију са свеобухватним последицама по начин конструисања и производње. Администрација америчког председника Била Клинтона је још 2000. године по-

кренула Националну иницијативу за нанотехнологију (*National Nanotechnology Initiative – NNI*), а Конгрес је, 2003. године, усвојио Закон о истраживању и развоју у области нанотехнологија у 21. веку (*21st Century Nanotechnology Research and Development Act*). Законом је установљен Национални нанотехнолошки програм (*National Nanotechnology Program*), који је у надлежности председника и Националног савета за науку и технологију како би се на државном нивоу осигурали делотворна координација успостављања потребне инфраструктуре, спровођења истраживачких пројеката и комерцијализације примењивих научних налаза и технолошких иновација (21stCNRDA, 2003). Закон је предвидео и дугорочна буџетска улагања неопходна за обезбеђење глобалног вођства САД у области нанотехнологија кроз унапређење продуктивности и конкурентности америчке индустрије, убрзање стварања *start-up* компанија, те подстицање интердисциплинарних истраживања и програма специјалистичког универзитетског и струковног образовања (21stCNRDA, 2003: 1923–1925). Текући Стратешки план националне нанотехнолошке иницијативе (*National Nanotechnology Initiative Strategic Plan*), усвојен 2021. године, поновио је приоритетне циљеве из претходних планова (NNISP, 2021).

Обим буџетских средстава намењених финансирању нанотехнолошких пројеката више владиних агенција вишеструко је увећан већ током првих неколико година примене тог закона (Andersson, 2008: 95). Износ буџетске линије од 2,16 милијарди долара, опредељене за Националну иницијативу за нанотехнологију за 2024. годину, највећи је до сада посматрајући појединачно, а за скоро две и по деценије у те сврхе је укупно издвојено 43 милијарде долара (NNIFY24, 2024: 5). Исти тренд се одигравао унутар Европске уније и у водећим азијским земљама. Стога не чуди што данас широм света постоји скоро четири хиљаде научних лабораторија и развојних центара, како у јавном тако и у приватном сектору, који спроводе истраживања у овој области (Nanowerk, 2024).

Језгро институционалног оквира за развој напредних војних способности чине четири водеће владине агенције унутар америчког сектора одбране са надлежностима у спровођењу трансдисциплинарних основних и примењених нанотехнолошких научних и развојних пројеката. То су:

- Истраживачка канцеларија копнених снага Војске САД (*Army Research Office*). Основана је 1951. године, као организациона јединица Истраживачке лабораторије за развој борбених способности при Команди Војске САД (*U.S. Army Combat Capabilities Development Command Army Research Laboratory*, DEVCOM ARL), са задатком да усмерава научна открића ка примени у развоју нових способности војске, подстиче проналажење решења за постојеће технолошке потребе војске и убрзава пренос резултата цивилних основних истраживања у војна примењена истраживања. Канцеларија врши одабир истраживачких и развојних пројеката чији су креатори научници и инжењери са престижних института и универзитета. Она их и финансира јер садрже потенцијал примене у војне сврхе у наредних 20 до 30 година (AROYR 2022, 2022: 5).
- Институт за нанотехнологије за војника (*Institute for Soldier Nanotechnologies*). Основан је 2002. године, као удружени подухват Пента-

гона и престижног Института за технологију Масачусетса (*Massachusetts Institute of Technology – MIT*), са задатком да применом нанотехнологија у области материјала, квантних наука, технологије енергије, електронике и фотоники унапреди заштиту, преживљавање и способности бораца, као и да дизајнира опрему и помоћне системе (ISN, 2024a).

- Институт за нанонауку Истраживачке лабораторије Морнарице САД (*Navy Research Laboratory's Institute for Nanoscience*). Основан је 2003. године са задатком да спроводи истраживања која повезују квантно и неуроморфно рачунарство, нанофотонику, нанобиотехнологију и технологију енергије (Institute for Nanoscience, 2024).
- Агенција за напредне одбрамбене истраживачке пројекте (*Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA*). Основана је 1958. године са мисијом да, умрежавањем водећих научника-иноватора као појединаца, истраживачких центара са различитих универзитета и компанија, створи предуслове за преображај револуционарних концепата у производе који се могу практично применити за потребе националне безбедности (DARPA, 2024).

Поља текуће и потенцијалне војне примене нанотехнологија

Војна примена нанотехнологија требало би да доведе до вишег степена заштите људства у борбеним операцијама, веће убојитости оружја (нпр. експлозивних направа), веће издржљивости материјала и уређаја, конструкције микро-уређаја (нанодронов и наноробота) и стварања хибридног облика хемијско-биолошког наоружања. На плану унапређења перформанси борбених авиона, пловила и копнених возила, на самом почетку 21. века било је планирано да се истраживачкоразвојни и конструкторски напори у САД усмере на остварење својстава вишефункционалности, смањене тежине и олакшаног маневрисања, беспосадног даљинског вођења, смањене термалне, радарске и акустичне видљивости, оперативности засноване на сензорним и обавештајним подацима и њиховом бежичном преносу, оперативне прилагодљивости променљивим условима у окружењу, самопоправљивости, енергетске ефикасности, те непробојности за непријатељско ватрено дејство (Simonis & Schilthuisen, 2006: 25–32). Сврха наведених планираних активности Пентагона јесте да се борбени системи будућности учине самоодрживим, покретљивијим, флексибилнијим, издржљивијим, убојитијим, те комуникационо-информационо и логистички одрживијим (Simonis & Schilthuisen, 2006: 44).

Напредни материјали

Највидљивији искорак нанотехнологија на плану контроле структуре на атомском и молекуларном нивоу уочава се у области материјала, односно науке о материјалима. Због тога побољшање материјала виталних за наоружање, војну опрему и возила представља подручје примене нанотехнологија у развоју одбрамбених капацитета САД где се очекују практични резултати у кратком и средњем року. Реч је о последици растуће доминације над материјалима у виду способности научника и инжењера да вештачки подстакну електроне тако да манифестују квантна својства и омогуће употребљивим електрично, оптичко, магнетно и термодинамичко понашање чврстих материјала (Rogers et al., 2015: 89–124).

Истраживачка канцеларија Оружаних снага САД начинила је искорак у откривању електронских, оптоелектронских и топлотних својстава минерала перовскита, што би у скоријој будућности могло да има пресудну улогу у замени силицијума као носећег полупроводника у рачунарима (AROYR 2022, 2022: 61–63). Поред тога, могућности лабораторијског дизајнирања кристалне микроструктуре тог минерала указале су на његову одличну респонзивност у инфрацрвеном делу спектра, погодну за унапређење уређаја за ноћни вид и сензора. У оквиру напора усмерених на револуционисање микроелектронике и рачунарске технологије, Институт за нанонауку Истраживачке лабораторије Морнарице САД ради на увођењу фотонских интегрисаних кола, која функционишу по принципу довођења светлости директно на полупроводник, а чија би масовна производња подстакла нагли развој високофреквентне обраде радарских сигнала (NRL, 2024: 3). Институт развија и дизајн чипова као компоненти будућих неуроморфних процесора и настоји да открије начине како се независни силицијумски „неурони“ могу „научити“ да обављају конкретне функције по узору на учење неурона у људском мозгу (NRL, 2024: 5). Такође, Агенција за напредне одбрамбене истраживачке пројекте (DARPA) остварила је важне резултате у обједињавању најбољих својстава фотона и електрона у електронском колу, чиме је омогућен огроман помак у унапређењу војних способности позиционирања и навигације у окружењу без подршке GPS-а, тродимензионалног мапирања и комуникационих система велике брзине (EPIC, 2024). Агенција је, 2023. године, покренула истраживачки програм стварања вештачких квантних наноструктура (*Synthetic Quantum Nanostructures*, SynQuaNon), како би се дизајнирањем синтетичких метаматеријала отпорних на високе температуре рада наноелектронских уређаја, заснованих на суперпроводницима, решио проблем велике енергије која је потребна за хлађење тих уређаја и стабилизovala обрада информација на квантном нивоу прецизности (DARPA, 2023).

Угљеничне наноцеви и дијамантски премази и влакна имају већи однос чврстоће и тежине од челика, што омогућава лакши и отпорнији оклоп, као и делове за возила и ваздухоплове (Carafano & Gudgel, 2007). На пример, било које копнено возило било би на тај начин боље заштићено од непријатељских експлозивних направа и ватре из малокалибарског оружја. Манипулисање појединим материјалима на нанонивоу производи оптички ефекат негативног преламања

светлости, односно вештачки савија светлост под угловима и у правцима који су иначе немогући у природи (Carafano & Gudgel, 2007). Тај поступак би могао да допринесе дизајнирању камуфлаже која савија светлост, па би се могло видети како се нпр. војник или возило крећу. Основна идеја јесте да се копнена возила, ваздухоплови и војни бродови учине у исто време и лакшим и чвршћим, што би знатно смањило потрошњу горива и повећало брзину и опсег кретања (Hilton, 2022b). На плану унапређења енергетске вредности горива, ћелије са чврстим оксидом могу да произведу више енергије од конвенционалних горива, док наночестице додате гориву могу да омогуће млазним авионима, тенковима и бродовима веће брзине и шири оперативни домет (Hilton, 2023).

Када је реч о побољшању дизајна панцира, нанотехнологије ће направити помак у односу на садашње резултате које је дала примена синтетичког материјала сачињеног од мешавине параарамидних влакана познатог као кевлар, који је и даље релативно тежак (око 14 кг) и тиме незгодан за ношење у борбеним акцијама (Hilton, 2022b). Због тога су напори научника, технолога и произвођача синтетичких влакана усмерени на огледе који треба да укажу на оптималне правце конструисања ојачаних материјала спајањем традиционалних природних материјала са угљеничним наноматеријалима, како би се постигла својства веће еластичности приликом удара пројектила велике брзине и уједно мања тежина самог материјала (Hilton, 2022a). Угљеничне наноцеви су више од сто пута отпорније од челика уз додатно ојачање различитим легурама (Olabi & Grunwald, 2007), док је магнетореолошки флуид (*Magnetorheological Fluid*, MR Fluid) течност са својством промене вискозности са променом снаге магнетног поља. Променом магнетног поља магнетореолошки флуид може прећи од чврстог у течан и обратно, што омогућава конструисање панцира прилагодљивог променљивим условима борбене операције (Olabi & Grunwald, 2007).

Сврха панцира није само да спречи улазак метка или шрапнела у тело војника, него и пренос кинетичке енергије самог удара на ткиво, јер и он може, у појединим околностима, довести до смртог исхода. Недавно је развијен материјал који због својства високе ефикасности у апсорбовању механичке енергије, мерено по граму, може да осигура бољу заштиту људског организма од различитих врста удара (пада, експлозије, вибрације), тако што хидрофобна молекуларна структура у виду „нанокавеза“ прима удар, а затим долази до њеног спонтаног истискивања (Sun et al., 2021). Додатна предност тог материјала, који има својства течности, јесте и могућност поновног коришћења након удара, јер може да прими више удара, што је посебно погодно за војну примену у конструисању оклопа и заштите рањиве инфраструктуре. Реч је значајном кораку, имајући у виду својства садашњих материјала за апсорпцију механичке енергије који се ослањају на пластичне деформације, ћелијско извијање и вискоеластичну дисипацију, а могу да приме само један удар. Истраживачи америчког Националног института за стандарде и технологију (*National Institute of Standards and Technology*) и компаније *Columbia Engineering* успели су да пронађу начин да ојачају природне материјале применом наночестица силицијум-диоксида премазаног полимерним нитима (Chen et al., 2021). Та иновација створила је способност новог материјала да у много већој мери распрши енергију ослобођену

у тачки балистичког удара, што ће имати значајну улогу у дизајнирању заштитног слоја на сателитима и свемирским летелицама, који су изложени сталним ударима микрокрхотина које круже Земљином орбитом веома великом брзином. Синтетизовани премаз обезбедиће додатну чврстину традиционалним материјалима (стаклу, пластици, металу и кевлару) када су изложени непријатељском ватреном дејству.

Годинама уназад лабораторијски се испитују начини остварења радарске и сонарне невидљивости војних ваздухоплова, пловила и подморница. Како би се у целости спречили или бар ублажили учинци нових сензорних технологија за откривање, за визуелну камуфлажу и сузбијање термичких и радарских знакова развијени су маскарна боја, адитиви за боје, цераде, мреже и пене (Hilton, 2022b). Специфична електромагнетна, термичка, хромогена и механичка својства материјала ниске уочљивости, или тзв. стелт (*Stealth*) материјала, требало би да допринесу ометању сензора у детектовању објекта хватањем емитованог или рефлектованог електромагнетног зрачења са његове површине (Hilton, 2022b). Од истраживача и инжењера се очекује да развију заштитне превлаке које ће мењати карактеристике рефлексије, апсорпције и распршивања електромагнетног зрачења у видљивом, инфрацрвеном и микроталасном делу спектра.

У низу обећавајућих нанотехнолошких достигнућа са потенцијалном војном применом, посебно је значајно инжењерско манипулисање материјалима на нонивоу ради унапређења физичких својстава различитих површина, додавања нових својстава и проналажења њихових нових функција за практичну примену. На спољним површинама возила, ваздухоплова, пловила и оружја, тежиште истраживања и инжењерских иновација заснива се на развоју нанокерамике и металних легура, те посебних суперхидрофобних премаза са својствима непромочивости, спречавања корозије и залеђивања, те смањења трења (ISN, 2024b).

Експлозиви и њихово откривање

У погледу побољшања ефикасности експлозива, нанотехнологије би требало да доведу до прецизније контроле детонације експлозивних направа, а молекуларна структура експлозивног материјала би се лабораторијски преуредила тако да се дође до оптималне сразмере честица и смеше састојака, која би затим омогућила максимализацију ослобођене енергије приликом праска (Carafano & Gudgel, 2007). Такав исход представљао би огроман напредак имајући у виду да је веома тешко тестирати садашње експлозиве, поготово за специфичне борбене намене. Напредак у балистици који се односи на употребу наноматеријала омогућио би вишеструко разорнију снагу много мање количине експлозивне масе, која би била упакована у пројектиле мањих димензија (Hilton, 2023). Тиме би се добиле мање али много убојитије бомбе, ракете, бојеве главе и друге врсте експлозивних направа, једнако као и побољшана способност пробоја оклопа или бункера. Такође, постоје и очекивања да се у даљој будућности конструишу микронуклеарне бомбе, масе једног до два килограма, али са експлозивном снагом мереном у десетинама тона конвенционалног експлозива (Hilton, 2023). Контро-

ла величине наночестица у експлозиву омогућила би контролу брзине детонације и њеног распрострањања, а већ деценију уназад се ради на успостављању усмерене детонације на ћелијском нивоу као методе уклањања канцерогених ћелија у људском организму (Chaban, 2015). Механизам усмерене детонације заснован је на тачном навођењу нанобомбе у виду честице која „експлодира“, тако што ослобађа енергију подстицањем тренутне декомпозиције, односно раскида унутрашњих атомских веза.

Већ две деценије уназад спроводе се истраживања под окриљем Института за нанонауку Истраживачке лабораторије Морнарице САД ради обједињавања примене вештачке интелигенције и нанотехнологија у дизајнирању сензора за откривање експлозивних испарљивих органских једињења, по узору на оштро чуло мириса скакаваца (Hamisevicz, 2024). Замисао је да се створи својеврстан „електронски нос“ у виду преносивог уређаја са уграђеном вештачком интелигенцијом са дугачким низом хемијских сензора са наночестицама. Сензори би се користили за израду масовне датотеке трагова различитих експлозивних пара, узето у различитим концентрацијама, ради усавршавања ефикасности евалуације будућих детектора експлозива. Институт је дизајнирао и уређај за бесконтактно лоцирање и идентификовање низа токсичних хемикалија (NRL, 2024: 25). Институт за нанотехнологије за војника конструисао је хемијски сензор високе осетљивости за откривање експлозива на даљину, заснован на наноструктурираним појачавајућим флуоросцентним полимерима (ISN, 2024в), док би научна достигнућа Агенције за напредне одбрамбене истраживачке пројекте у пољу квантне физике требало да даље побољшају прецизност сензора (QSC, 2024).

Нанодронови и нанороботи

Почетком 21. века кренуло се са концептуализацијом нанодронова који би – заједно са интегрисаним микросистемом глобалног позиционирања (GPS), антеном, системом за контролу лета и сателитским комуникационим системом заснованим на интернету ствари (*Internet of Things*, IoT) – чинили ослонац операција извиђања и осматрања америчких оружаних снага. Даљи напредак у технологији беспилотних летелица отвара могућност за израду тзв. вештачких летећих инсеката, тј. нанолетелица (*Nano unmanned aerial vehicles* – NUAUV), које би могле да неопажено приђу непријатељском положају, нпр. некој згради, и прикупе обавештајне податке или ватрено дејствују. Такве беспилотне летелице имале би значајну улогу у сценаријима ратовања у градским срединама, јер би уз примену биомимичког дизајна биле мање упадљиве за непријатељске трупе. На пример, један од врло вероватних борбених сценарија предвиђа борбено ангажовање великог роја сићушних, и стога тешко оборивих нанодронова, који би здруженим дејством умножили разорну моћ уколико би били усмерени на неку концентрисану мету високе вредности, нпр. командни штаб, складиште муниције или горива (Hilton, 2022b). Преображај нанодронова у нанороботе биће могућ тек са развојем својства пуне аутономије, односно тек када ти војни уређаји буду имали уграђене способности опажања, вештачке интелигенције и самосталног

извршавања одабраних опција деловања (тзв. три основна начела роботике). Услед тога, још пре две деценије се схватило да ће примену наноробота у копненим и поморским операцијама омогућити тек повећање снаге процесора будућих квантних рачунара и меморијског капацитета наноелектронике, смањење тежине механичких структура и побољшање преносивих извора електричне енергије (Simonis & Schilthuisen, 2006: 58–59). Оперативна употреба нанороботских система условљена је могућношћу умрежавања са борцем и командом, који затим могу да у реалном времену анализирају податке које су прикупили нанороботи.

Основни проблем који конструктори и технолози морају да реше јесте како израдити довољно снажно, а у исто време минијатурно напајање, како би „летећи инсекти“ имали оперативно релевантан домет. Корак ка унапређењу јачине извора напајања у односу на његову тежину представља прототип преносивог генератора *Mesodyne LightCell*, заснован на употреби наноструктурираних геометрија фотонских кристала за модификацију нормалне густине стања фотона (ISN, 2024г). Од тог генератора се очекује да борбеним системима у којима је тежина критичан фактор омогући продужене операције, посебно војним роботима, беспилотним ваздухопловима и војницима на продуженим борбеним задацима (ISN, 2024г).

Микросателити

Сателити су данас скоро незаменљиви уређаји за обављање цивилних задатака у области даљинског прикупљања разноврсних података, телекомуникација, телевизијског емитовања и глобалног позиционирања, као и задатака прикупљања обавештајних података, осматрања и циљања у домену глобалног пројектовања америчке војне моћи. Остваривост претње онеспособљавања или уништавања сателита расте упоредо са развојем оружја са усмереном енергијом великог домета, тј. ласера или микроталаса велике снаге, и унапређења прецизности противсателитских пројектила. Због тога ће, захваљујући великом напретку у технологији микропроцесора, у блиској будућности класични сателити бити замењени микросателитима, јер ће бити много мањих димензија (у просеку 1 dm^3), а самим тим лакши и енергетски ефикаснији (Simonis & Schilthuisen, 2006: 63). Микросателити ће стога бити јефтинији за серијску производњу и позиционирање у Земљину орбиту у ројевима, јер ће постојати и могућност њиховог саједства међусобним бежичним повезивањем. Ројеви умрежених микросателита прецизније ће обављати задатке детаљног осматрања у високој резолуцији и прикупљања обавештајних података о непријатељским операцијама, а користиће се и за уништавање непријатељевих сателита (Simonis & Schilthuisen, 2006: 63). Микросателити ће моћи неопажено да се причврсте на велике сателите тако да могу да униште њихове важне делове или им ометају рад, док ће минијатурне димензије микросателита непријатељу отежати гађање.

Војник као биотичко-абиотички *interface*

Развој војне примене нанотехнологија усредсређен је и на оспособљавање америчког војника да буде врло убојит и самоодржив борбени ентитет, ојачан вештачком интелигенцијом и микросистемом за надзор телесних функција, те осигуран од балистичких, биолошких и хемијских непријатељских удара (Simonis & Schilthuizen, 2006: 41–51). Војник будућности замишљен је као својеврстан борбени биотичко-абиотички *interface*, који делотворно умрежава телесне функције са опремом. Реч је о концепту „бежичног војника“ (*wireless soldier*) опремљеног напредним техничким системом (*Body Area Network*) сачињеним од више умрежених уређаја – мобилног телефона, ручног часовника, „паметног“ шлема са визиром и миниекраном, малих слушалица, оружја и различитих сензора уграђених у униформу или само тело (бионички чипови). „Бежични војник“ био би умрежен са надлежном командом и у реалном времену би са претпостављеним заповедником и саборцима размењивао информације о извођењу додељеног борбеног задатка (Hilton, 2023). На тај начин, борац би у сваком тренутку могао да сагледа сопствени положај и распоред сабораца у променљивим и непредвидљивим условима вођења борбене операције (тзв. магла рата), као и сопствено физичко и ментално стање. Такође, војници би у реалном времену прикупљали релевантне податке са бојишта и слали их команди ради квалитетнијег одлучивања о даљем смеру борбене акције.

Стални проблем при дизајнирању војне униформе јесте како спречити да дође до утрнућа војникових екстремитета, а тиме и пада борбеног учинка. Недавна истраживања америчких хемичара са Универзитета Стенфорд показала су да сребрне нанонити уткане у памучни материјал могу да га загреју, ако се кроз њих проведе струја малог напона (Nano, 2017). Тренутно се експериментише са тканинама од полиестера и мешавине памука и најлона у које су уграђени нанонити и хидрогелови, како би материјал био погодан за униформу која би задржала топлоту и била удобна у екстремно хладним временским условима, те спречила продор зноја у остатак гардеробе (Nano, 2017). Напредне тканине омогућиле би тању, а тиме и лакшу униформу за зимске услове, а војник би могао сам да регулише њено загревање или би она имала аутоматизован контролни механизам телесне температуре који би хладио или загревао војника сходно временским условима (Hilton, 2022a). На тај начин војник би могао и сам да подешава телесну температуру како би се „утопио“ у температуру околног терена, те тиме избегао да његов положај лако открију непријатељеве термалне камере (Hilton, 2022a).

Будући амерички војник имаће униформу отпорну на све врсте непријатељских удара – метака, делића активираних експлозивних направа, биохемијских агенса итд. Нанотехнологија ће омогућити интегрисане сензоре на етикети и интегрисане мреже од нановлакна са капацитетом упијања, деактивације и деконтаминације хемијског и биолошког оружја, а у изгледу је и њихова примена за откривање радиоактивности (Hilton, 2023). Униформа ће имати способност прилагодљиве камуфлаже, тако што ће мењати dezen како би се уклопила у терен. Наноматеријали са својствима хромогености, односно промене боје при

примени спољашњих стимуланса, као што су светло, топлотно, електрично или магнетно поље, вероватно ће бити примењени за конструисање прилагодљиве камуфлаже. Војничке чизме садржаће плочице за идентификацију путем радио- фреквенције (*Radio frequency identification* – RFID) за контролу приступа, позиционирање и прикупљање и анализу различитих агенса са земље. Институт за нанонауку Истраживачке лабораторије Морнарице САД већ више од десет година развија нове материјале функционалним спајањем биолошких молекула са наночестицама, како би се даље отворио пут ка пробојима у прикупљању енергије за побољшање способности бораца (McKinney, 2014).

Већ две деценије разрађује се модел примене имплантата у виду убризгавања наномашина у тело војника као део система за динамичко праћење његових активности у борбеном дејству (Altman & Gubrud, 2004). Сваки војник био би означен идентификационом ознаком на основу наномашине убризгане у његово тело, а команда би 24 часа дневно могла да прати његово кретање и у реалном времену надгледа податке о стању телесних функција (нпр. излученог зноја, откуцаја срца, крвног притиска, нивоа шећера у крви и садржаја кисеоника), уносу хране и воде, брзини ходања и трчања и тежини повреда. Наредна генерација наноробота биће израђена од текстила и еластичних полимера, како би што удобније пријањали уз тело и покрете (Wood & Walsh, 2013). Све прикупљене податке о стању телесних функција, те податке о томе како војник управља болом и страхом, анализирали би вештачка интелигенција, како би надлежна команда доносила прецизније и брже одлуке.

Закључак

Увећање броја нанотехнолошких програма и пројеката под финансијским и институционалним окриљем државе и министарства одбране, до којег је дошло током претходне деценије и по, означило је захуктавање нове трке усмерене на стицање што бољег положаја у глобалној борби за војнотехнолошку надмоћ. Иако је тренутно скрајнута оживљавањем нуклеарне претње због ескалације рата у Украјини, велика је вероватноћа да ће та трка у перспективи преобликовати хоризонт ратовања у 21. веку. Разлог убрзавања нове „спирале“ наоружавања лежи у проценама да би отелотворење нанотехнолошких решења у ратовању, сходно садашњим визијама и иновацијским плановима, представљало тако велики искорак у осавремењивању војних способности да би држава која прва то успе да оствари могла скоро у потпуности да деградира војне потенцијале противника.

Анализа овог рада односи се на остварена и очекивана достигнућа основних и примењених нанотехнолошких научних и развојних пројеката са потенцијалом за војну примену у САД, и то у пољима напредних материјала, експлозива и њихових детектора, нанодронов и наноробота, микросателита и војника-киборга. Преглед садржине пројеката, постављених циљева и досадашњих резултата указује на то да конкретна војна примена већине нанотехнолошких достигнућа и даље остаје орочена на будућност – ближу или даљу. Додатно ограничење

односи се на чињеницу да највећи број остварених иновација пружа решење за веома специфичне проблеме. Исход досадашњих нанотехнолошких напора још увек је фрагментарне природе посматрано из перспективе политичког циља свеобухватне модернизације Оружаних снага САД. Следећи корак – међусобно повезивање учинака различитих нанотехнолошких решења које би кумулативно дало системски одговор на потребе унапређења војних способности – још увек није начињен. Медијски спиновано узбуђење око наводно оствареног домета нанотехнологија у војној примени полако сплашавава услед одсуства масовне производње наноматеријала са јединственим својствима и уређаја са знатно побољшаним перформансама.

Политички одлучиоци често се препуштају неутемељеном технооптимизму, јер он маркетиншким манипулацијама може лако да се претвори у звучна предизборна обећања. На пример, сам амерички концепт револуције војних послова претрпео је у међувремену озбиљне критике у академским и стручним круговима (видети Collins & Futter, 2015), па је током последње две деценије из званичне терминологије уклоњена реч „револуција” у корист синтагме „војни преображај”. Премда ће САД наставити да улажу у истраживања и развој, чини се да почетне наде и очекивања неће бити линеарно испуњени. Напротив, примена плодова технолошког напретка тесно је повезана са њиховом тржишном и употребном вредношћу, па је важно узети у обзир успоравајући чинилац у виду мањка техничког разумевања ограничења и њихових друштвених импликација. Продубљено истраживање офанзивних и дефанзивних могућности нанотехнолошких достигнућа САД било би веома корисно с аспекта домаће војне науке и планирања одбрамбене политике, као део аналитичког покушаја да се на време исправно протумаче и предвиде импликације, посебно у околностима када би за евентуално пројектовање тако напредне војне моћи било тешко пронаћи симетричан одговор.

Литература

- [1] [21stCNRDA] 21st Century Nanotechnology Research and Development Act (2003, December 3). 108th Congress (2003–2004). <https://www.congress.gov/bill/108th-congress/senate-bill/189/text>.
- [2] Altmann, J., Gubrud, M. (2004). Anticipating military nanotechnology. *IEEE Technology and Society Magazine* 23 (4): 33–40.
- [3] [AMS 2019] The 2019 Army Modernization Strategy (2018). U.S. Army. https://www.army.mil/e2/downloads/rv7/2019_army_modernization_strategy_final.pdf.
- [4] Andersson, K. (2008). *Transparency and Accountability in Science and Politics: The awareness principle*. Basingstoke & New York: Palgrave Macmillan.
- [5] Army of 2030 (2022, October 5). U.S. Army. <https://www.army.mil/article/260799>.
- [6] [AROYR 2022] Army Research Office Year in Review 2022 (2022). U.S. Army Combat Capabilities Development Command Army Research Laboratory (DEVCOM ARL). <https://arl.devcom.army.mil/wp-content/uploads/sites/3/2023/06/ARO-YEAR-IN-REVIEW-2022-WEB-FINAL.pdf>.

- [7] Carafano, J., Gudge, A. (2007). *Nanotechnology and National Security: Small Changes, Big Impact*. The Heritage Foundation. <https://www.heritage.org/defense/report/nanotechnology-and-national-security-small-changes-big-impact>.
- [8] Chaban, V. (2015). *Spotlight: Nanoscale Bombs*. Homeland Defense and Security Information Analysis Center (HDIAC), U.S. Department of Defense. <https://hdiac.org/articles/spotlight-nanoscale-bombs/>
- [9] Charan, R. (2022, September 19). What Defines a Successful Organization? *Harvard Business Review*. <https://hbr.org/2022/09/what-defines-a-successful-organization>.
- [10] Chen, S. H., Souna, A. J., Stranick, S. J., Jhalaria, M., Kumar, S. K., Soles, C. L., Chan, E. P. (2021). Controlling toughness of polymer-grafted nanoparticle composites for impact mitigation. *Soft Matter* 22: 256–261.
- [11] Cohen, E. A. (1996). A Revolution in Warfare. *Foreign Affairs* 75 (2): 37–54.
- [12] Cohen, R. S., Chandler, N., Efron, S., Frederick, B., Han, E., Klein, K., Morgan, F. E., Rhoades, A. L., Shatz, H. J., Shokh, Y. (2020). *The Future of Warfare in 2030: Project Overview and Conclusions*. Santa Monica: RAND Corporation.
- [13] Crevel, M. V. (2000). *The Art of War and Military Thought*. London: Cassell & Co.
- [14] Dahl, E. J. (2002). Network Centric Warfare and the Death of Operational Art. *Defence Studies* 2 (1): 1–24.
- [15] DARPA (2024). About DARPA. Defense Advanced Research Projects Agency. <https://www.darpa.mil/about-us/about-darpa>.
- [16] DARPA (2023). Embarking on Quest for New Quantum Materials. Defense Advanced Research Projects Agency. <https://www.darpa.mil/news-events/2023-08-09-a>.
- [17] Del Monte, L. A. (2017). *Nanoweapons: A growing threat to humanity*. Lincoln (NB): Potomac Books.
- [18] Dombrowski, P., Gholz, E. (2006). *Buying military transformation: technological innovation and the defense industry*. New York: Columbia University Press.
- [19] Dong, H., Gao, Y., Sinko, P. J., Wu, Z., Xu, J., Jia, L. (2016). The nanotechnology race between China and the United States. *Nano Today* 11 (1): 7–12.
- [20] [EPIC] Electronic & Photonic Integrated Circuit Program (2024). Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). https://www.darpa.mil/attachments/EPIC_Layout_final.pdf.
- [21] Gray, C. (2005). *Another Bloody Century: Future Warfare*. London: Weidenfeld & Nicolson.
- [22] Guzzetti, L. (2010). Global war and technoscience. Y: Alessandro Dal Lago, Salvatore Palidda (ured.), *Conflict, Security and the Reshaping of Society: The civilization of war* (стр. 84–100). Oxon & New York: Routledge.
- [23] Hamisevicz, M. (2024, March 6). NRL Researcher Awarded Grant to Study Nanotechnology Sensors. U.S. Naval Research Laboratory News. <https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/3697803/nrl-researcher-awarded-grant-to-study-nanotechnology-sensors/>.

- [24] Hilton, S. (2023). Developing Nanotechnology in the Defence Industry. Nano Chemi Group Blog. <https://blog.nanochemigroup.cz/developing-nanotechnology-in-the-defence-industry/>.
- [25] Hilton, S. (2022a). The Soldier of Tomorrow will Rely on Nanotechnology with His Life. Nano Chemi Group Blog. <https://blog.nanochemigroup.cz/the-soldier-of-tomorrow-will-rely-on-nanotechnology-with-his-life/>.
- [26] Hilton, S. (2022b). Nanotechnology and the Military: How Tiny Materials Can Win Wars. Nano Chemi Group Blog. <https://blog.nanochemigroup.cz/nanotechnology-and-the-military-how-tiny-materials-can-win-wars/>.
- [27] Institute for Nanoscience (2024). U.S. Naval Research Laboratory. <https://www.nrl.navy.mil/nanoscience/>.
- [28] [ISN] Institute for Soldier Nanotechnologies (2024a). Strategic Research Areas. <https://isn.mit.edu/strategic-research-areas>.
- [29] [ISN] Institute for Soldier Nanotechnologies (2024b). Grain Boundary-Engineered Nanocrystalline Metal Alloys. <https://isn.mit.edu/grain-boundary-engineered-nanocrystalline-metal-alloys>.
- [30] [ISN] Institute for Soldier Nanotechnologies (2024c). Ultrasensitive Explosives Detection. <https://isn.mit.edu/ultrasensitive-explosives-detection>.
- [31] [ISN] Institute for Soldier Nanotechnologies (2024d). Photonic Crystals to Control Light Radiation. <https://isn.mit.edu/photonic-crystals-control-light-radiation>.
- [32] Janković, S., Mitić, A. (2024). Competing Visions of World Order: How China, the US, the EU and Russia Conceive the Transition to Multipolarity. U: Dušan Proroković, Paolo Sellari, Rich Misfud (ured.), *Global Security and International Relations after the Escalation of the Ukrainian Crisis*, 102–131. Belgrade, Rome, Clarksville: Institute of International Politics and Economics, University of Belgrade – Faculty of Security, Sapienza University, Austin Peay State University – Department of Political Science.
- [33] [JOE 2035] Joint Operating Environment 2035: The Joint Force in a Contested World (2016, July 14). Joint Chiefs of Staff, U.S Army. Washington, D.C. https://www.jcs.mil/Portals/36/Documents/Doctrine/concepts/joe_2035_july16.pdf.
- [34] Kanton, Dž. (2009). *Ekstremna budućnost*. Beograd: Clio.
- [35] Kostić, M. (2018). Čija hegemonija? – svet u uslovima takmičenja za novu globalnu vladavinu. *Međunarodni problemi* LXX (4): 391–411.
- [36] Krepinevich, A. F. & B. D. Watts (2014). *The Last Warrior: Andrew Marshall and the Shaping of American Defense Strategy*. New York: Basic Civitas Books.
- [37] McKinney, D. (2014, August 12). Dr. Igor Medintz Honored with 2013 Arthur S. Flemming Award. U.S. Naval Research Laboratory News. <https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/2554573/dr-igor-medintz-honored-with-2013-arthur-s-flemming-award/>.
- [38] Mills, M. A., Mills, M. P. (2014). The Invention of the War Machine: Science, technology, and the First World War. *The New Atlantis – A Journal of Technology & Society* 42: 3–23.

- [39] [Nano] (2017, August 21). Nanotechnology could keep soldiers warm. *Nano – The Magazine for Small Science*. <https://nano-magazine.com/news/2017/8/21/nanotechnology-could-keep-soldiers-warm?rq=soldier>.
- [40] Nanowerk (2024). Nanotechnology Company & Research Labs Directory, 8 October. https://www.nanowerk.com/nanotechnology/research/nanotechnology_links.php.
- [41] [NDS] National Defense Strategy (2022, October 27). U.S. Department of Defense. Washington, DC. <https://media.defense.gov/2022/Oct/27/2003103845/-1/-1/1/2022-NATIONAL-DEFENSE-STRATEGY-NPR-MDR.PDF>.
- [42] [NDSTS] National Defense Science and Technology Strategy 2023 (2023). U.S. Department of Defense. Washington, DC. <https://www.cto.mil/wp-content/uploads/2023/05/2023-NDSTS.pdf>.
- [43] Nichols, G. (2017). Nanotechnology & the New Arms Race. *HDIAC Journal – Journal of the Homeland Defense & Security Information Analysis Center* 4 (2): 18–23.
- [44] [NNIFY24] National Nanotechnology Initiative Supplement to the President's 2024 Budget (2024, March). Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering, and Technology, Committee on Technology, National Science and Technology Council. https://www.nano.gov/sites/default/files/pub_resource/NNI-FY24-Budget-Supplement.pdf.
- [45] [NNISP] National Nanotechnology Initiative Strategic Plan (2021, October). A Report by the Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering, and Technology, Committee on Technology, National Science and Technology Council. https://www.nano.gov/sites/default/files/pub_resource/NNI-2021-Strategic-Plan.pdf.
- [46] [NRL] 25 Technologies for the Next 25 Years (2023–2048) (2024, April). U.S. Naval Research Laboratory. https://www.nrl.navy.mil/Portals/38/PDF%20Files/25%20for%2025%20Booklet_FINAL.pdf?ver=1a5kY1mPKQ1JpzBllaWuew%3d%3d×tamp=1713356065667.
- [47] [NSS] National Security Strategy (2022, October 12). White House. Washington, DC. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/10/Biden-Harris-Administrations-National-Security-Strategy-10.2022.pdf>.
- [48] Olabi, A. G., Grunwald, A. (2007). Design and application of magneto-rheological fluid. *Materials & Design* 28 (10): 2658–2664.
- [49] Rogers, B., Adams, J., Pennathur, S. (2015). *Nanotechnology: Understanding Small Systems* [Third Edition]. Boca Raton (FL): CRC Press.
- [50] [QSC] (2024). Quantum Sensing and Computing. Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). <https://www.darpa.mil/attachments/QuantumSensingLayout2.pdf>.
- [51] Simonis, F., Schilthuisen, S. (2006). *Nanotechnology: Innovation opportunities for tomorrow's defence*. Amsterdam: TNO (Nederlandse organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek), Future Technology Center.
- [52] Sun, Y., Rogge, S. M. J., Lamaire, A., Vandenbrande, S., Wieme, J., Siviour, C. R., Van Speybroeck, V., Tan, J. (2021). High-rate nanofluidic energy absorption in porous zeolitic frameworks. *Nature Materials* 20: 1015–1023.

[53] The Army Strategy (2018). U.S. Army. https://www.army.mil/e2/downloads/rv7/the_army_strategy_2018.pdf.

[54] The Army Vision for 2028 (2018). U.S. Army. https://www.army.mil/e2/downloads/rv7/vision/the_army_vision.pdf?_st.

[55] Wood, R., Walsh, C. (2013). Smaller, Softer, Safer, Smarter Robots. *Science – Translational Medicine* 5 (210). DOI: 10.1126/scitranslmed.3006949

[56] Костић, М. (2008). Мрежноцентрично ратовање у теорији и пракси ОС САД. *Војно дело* LX (2): 175–199.

[57] Хауард, М. (1999). *Рат у европској историји*. Београд: СКЦ.

[58] Хаукрофт, Џ. (2008). Мрежноцентрично ратовање у Ираку 2003. године – искуства и поуке. *Војно дело* LX (4): 78–94.

Резиме

Рад разматра јавно доступне резултате истраживања и технолошке иновације у области нанотехнологија у контексту модернизације војних способности САД ради делотворног одржавања њихове глобалне надмоћи која се све чешће оспорава. Полази се од претпоставке да је развој софистицираних војних способности, лоцираних у дометима Четврте индустријске револуције, кључна компонента за изградњу одрживе војне моћи у 21. веку, односно делотворне глобалне манифестације оружане силе широм света. Без обзира на достигнућа кинеске науке и технологије са потенцијалом за примену у војсци, аутор је одабрао Сједињене Америчке Државе за студију случаја због њихове доминантне улоге у померању граница нанотехнологије. Поред тога, Сједињене Америчке Државе као водећа сила НАТО, представљају узор другим националним војскама Запада у смислу стратешке, доктринарне и организацијске политике. Текуће и очекивано прекомпоновање глобалне моћи на почетку 21. века, убрзало је модернизацију војске САД кроз дизајнирање иновативног наоружања и других војних система заснованих на напредним технологијама Четврте индустријске револуције. Сва релевантна стратегијска документа препознају напредне технологије као централни фактор за надметање у међународној арени, указујући на нанотехнологију као област са високим степеном пројектованог позитивног утицаја основних истраживања на модернизацију војних капацитета. Главне владине агенције у сектору одбране САД надлежне за спровођење трансдисциплинарних основних и примењених научноистраживачких пројеката у области нанотехнологија су: 1) Истраживачка канцеларија Оружаних снага САД (Army Research Office) организациона јединица Истраживачке лабораторије за развој борбених способности при Команди Војске САД (U.S. Army Combat Capabilities Development Command Army Research Laboratory, DEVCOM ARL), 2) Институт за нанотехнологије за војника (Institute for Soldier Nanotechnologies), 3) Институт за нанонауку Истраживачке лабораторије Морнарице САД (Navy Research Laboratory's Institute for Nanoscience), и 4) Агенција за напредне одбрамбене истраживачке пројекте (Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)). Анализа је усредсређена

на остварена и очекивана достигнућа са потенцијалом за војну примену, произтекла из јавно доступних података о основним и примењеним нанотехнолошким научним и развојним пројектима обухваћеним одбрамбеним буџетом, као и на достигнућа представљена и стручној литератури. Анализа обухвата напредне материјале, експлозиве и њихове детекторе, нанодронове и нанороботе, микросателите и војнике-киборге. Међутим, очување способности делотворне манифестације војне силе на међународној сцени захтева успешну употребу новог наоружања, односно његову делотворну интеграцију у стратешко и доктринарно планирање као и у процес доношења одлука на бојишту. Процена будућег кумулативног утицаја анализираних нанотехнолошких достигнућа која се могу применити у војне сврхе зависи од много варијабли и тиме није поуздана за рационално доношење одлука као компонента војног планирања. Мање је вероватно да ће будућа успешна трансформација нанотехнолошких достигнућа у конкретне војне способности сама по себи решити проблем ерозије технолошке супериорности САД над изазивачима на глобалном нивоу. Упркос повећаној асиметрији на рачун других великих сила које изазивају положај САД и потенцијалних изазивача са глобалне периферије, сама нанотехнолошка надмоћ се тешко може постићи праволинијски, јер строги захтеви у погледу оперативне поузданости нових система наоружања могу бити жртвовани из војно-политичких мотива да се нова технологија брзо уведе у употребу. Аутор закључује да приликом процене будуће употребе садашњих и очекиваних достигнућа у војној нанотехнологији, „нано манију“ треба избегавати, будући да функционална интеграција софистицираних решења није линеарна нити једнозначна, односно, она сама по себи не води до веће делотворности војних способности на бојишту, нити до огромне предности над непријатељем.

Кључне речи: *нанотехнологије, наоружање, ратовање, одбрамбена политика, војска, Оружане снаге САД.*

© 2024 Аутор. Објавило *Војно дело* (<http://www.vojnodelo.mod.gov.rs>). Ово је чланак отвореног приступа и дистрибуира се у складу са лиценцом Creative Commons (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



NANOTECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF US MILITARY CAPABILITIES IN 21ST CENTURY*

Srđan T. Korać¹

Достављен: 04.12.2024.

Језик рада: Српски

Кориговано: 27.02.2025.

Тип рада: прегледни рад

Прихваћен: 11.03.2025.

DOI број: 10.5937/vojdolo2404081K

The paper examines publicly available scientific achievements and technical and technological innovations in nanotechnology brought into the context of the modernization of US military capabilities. The starting assumption is that the development of sophisticated military capabilities centred around achievements of the Fourth Industrial Revolution is a key guarantor of sustainable military power in 21st century, or successful global projection of armed force as a means of preserving hegemony worldwide. The analysis focuses on achieved and anticipated breakthroughs with the potential for military application resulting from publicly available primary and applied scientific and developmental projects in the field of nanotechnologies covered by the defence budget, as well as on achievements presented in scientific and professional literature. The analysis includes achievements in the following fields: advanced materials, explosives and their detectors, nano drones and nanorobots, microsatellites, and cyborg soldiers. The author concludes that the future utilization of the breakthroughs in the development of nanotechnology for military purposes can be limited by problems of the functional integration of sophisticated solutions into the military-strategic, operational and tactical framework, hence, the technological "leap" does not necessarily lead to greater effectiveness of military capabilities on the battlefield.

Key words: *nanotechnologies, weaponry, warfare, defence policy, the military, US Armed Forces.*

The future of warfare is not synonymous with future technology,
but warfare must always have a technological dimension.

Colin Gray
(Gray, 2005: 98)

* The paper was produced in the framework of the Plan for Scientific-Research Activity for the year 2024 of the Institute for Political Studies in Belgrade, financed by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia.

¹ The Institute for Political Studies, Belgrade, Republic of Serbia, E-mail: srdjan.korac@ips.ac.rs, <https://orcid.org/0000-0003-0722-6419>.

The Future of Warfare in the Mirror of Technological “Leaps”

The basic idea that has guided war leaders to encourage military-technological “leaps” was the invention of new combat assets and devising accompanying tactics to defeat enemies with minimal losses (Crevelde, 2000; Howard, 1999). In 19th and early 20th century, accelerated scientific-technological progress and industrialisation opened a new chapter in the history of war in the form of dramatic technical enhancements: the range of arms was extended, their precision improved and their impact became more devastating. In 1918, in one scientific journal, the First World War was rightfully labelled “engineers’ war” and the beginning of the process of systematic linkage of technology, industry, science, and military planning (Mills & Mills, 2014: 3, 10, 12–20). This process played a decisive role during the Second World War (Howard, 1999: 165–190), and military industry in the post-war period grew into a new branch of economy, thus becoming a profitable exporter to world market and legitimate leader of economic growth. Stepping into the era of information generated a wave of radical changes in military organisation, strategic thinking, and the manner of waging war, encompassed by the phrase “Revolution of Military Affairs”, with the concept of the network-centric warfare as the backbone of the overall reforms (Kostić, 2008, Haukroft, 2008; Dahl, 2002). The introduction of military affairs revolution into the modern canon of military thought and practice created a belief that, in circumstances of purposelessness of the use of nuclear weapon and reduced importance of sheer numerical strength, it is necessary to make a qualitative step forward in the development of conventional military capabilities, in the form of mastering advanced technologies emerging on the social horizon (Cohen, 1996; Dombrowski & Gholz, 2006: 5–6; Krepinevich & Watts, 2014: 193–226).

The imperative of transformation for the purpose of adapting to the speed and nature of external changes in the surroundings is a permanent characteristic of each organisation that wishes to achieve assigned goals successfully (Charan, 2022), including modern armed forces. What are the changes in global landscape that are taking place in early 21st century that demand swift modernisation of US military? According to assessments of foreign policy decision-makers from Washington, and evaluations presented in scientific and professional literature in the field of international relations, the second and third decade of the ongoing century could bring massive turbulences reflected in the challenging of international norms, persisting undermining of democratic order and rearrangement of international system (Janković & Mitić, 2024; Kostić, 2018: 397–407). A study on fundamental trends that will shape international conflicts around 2030 and consequences for the US foreign and defence policy, which was produced in 2020 by RAND Corporation, highly influential in Washington establishment, cautions political decision-makers against gradual but continuous erosion of quantitative and qualitative elements of several decade long US military supremacy. The study authors note that the continuous reduction in the size of US conventional armed forces led to a gradual loss of advantage over rivals, primarily China, especially in terms of investments in military capacities modernisation (Cohen et al., 2020:

54–62). That is why, according to evaluation from the study, it is very important for the USA to maintain defence industry, diminished over two previous decades, at the level necessary for unhindered development and production of innovative armed systems based on advanced technologies (Cohen et al., 2020: 60–62).

A successful outcome of the long-term linkage between programmes of scientific research and technical-technological development for military purposes at universities and in corporative world is visible precisely in the preservation of US military technological vitality even in the beginning of 21st century (Guzzetti, 2010; Dombrowski & Gholz, 2006). The US National Security Strategy of 2022 recognises technology as the central element of geopolitical competition in the international arena, and consequently, of the preservation and improvement of national security through deterrence in the form of military supremacy based on investments in innovations and advanced technologies of the Fourth industrial revolution (NSS, 2022: 32–34). Because of that, the 2022 US National Defence Strategy, adopted in October 2022, envisages relying on the application of new advanced technologies in the process of armed forces modernisation aimed at the creation of deterring and operational supremacy over enemy forces, which should be accomplished through the synergy of all relevant state bodies and entrepreneurial potential of the private sector and creative and innovative potential of the scientific community (NDS, 2022: 17, 19). In efforts to respond as effectively as possible to the changed operational challenges by investing in military industry and civilian sector of economy to arrive at technological solutions, the Pentagon opts for the approach of quick identification of the most promising ideas, experimentation with prototypes, production and introduction of the product final version into combat operations (NDS, 2022: 19). The National Defence Science and Technology Strategy 2023 also stresses the importance of maintaining technological supremacy of the USA and NATO Members over other great powers (primarily China) as a vital precondition for the achievement of strategic goals of national security (NDSTS, 2023: 3–4, 9). Similar priorities are mentioned in the Strategy for the 2019 Army Modernisation Strategy (AMS 2019, 2018: 8–9), which is a framework that develops reform goals until 2035.

The backbone of US army development in 21st century - defined in a document titled Joint Vision 2020 and traced by the documents Army 2030, the Army Strategy and the Army Vision for 2028 - consists of a central idea of the so-called western way of war, which relies on maximising high-technology capabilities to minimise human losses - both civilian and military (Joint Vision 2020, 2000; The Army Strategy, 2018; The Army Vision for 2028, 2018; Army of 2030, 2022). According to said documents, the modernisation should make US military more flexible, adaptable and agile, capable of deploying troops quickly, and conducting complex combat operations worldwide, in high and low intensity conflicts alike. A study into the adaptation of capacities, operational methodology and budget of US armed forces, changed nature of potential global defence challenges expected in the period till 2035, titled Joint Operating Environment 2035, cautions against the high likelihood of jeopardising US global interests because of a gradual establishment of technological parity between the USA and other (potentially hostile) great powers (JOE 2035, 2016: 15). The study findings recommend reshaping the armed forces in a way that makes them capable of responding equally effectively to innovative enemy application of advanced and conventional

technologies wherever they are compelled to project its armed force (JOE 2035, 2016: 15). In addition to robotics, biology, energy and information technology, the document recognises nanotechnology as the field with a high degree of projected positive impact of its primary studies on the modernisation of military capacities, especially in the field of development of metamaterials, engineered modification of structural characteristics of materials at nano level, and nano satellites (JOE 2035, 2016: 16).

The continuation of the paper will provide a review of possible directions of the development and adaptation of nanotechnology for military purposes through the analysis of publicly available projects encompassed by defence budget and accompanying scientific and professional literature. The United States of America have been selected as the case for the study for three reasons. Firstly, regardless of the breakthroughs in Chinese, Russian, and Iranian science and technology used for the purposes of defence policy in two previous decades (for example establishing specialised governmental organisations for development, and strengthening cooperation between science, economy and military in the field of nanotechnology), the USA manage to keep the leading role in pushing the limits of nanotechnologies (Dong et al., 2016; Del Monte, 2017: 194–203). Secondly, it is a military power, which, as a leader of NATO, represents a role model to other countries of western civilisational circle in terms of strategic, doctrinal, and organisational shaping of the military in 21st century. The Pentagon and national ministries of defence of that alliance member states - primarily Great Britain, France and Germany - exchange knowledge and carry out joint projects in the field of nanotechnologies and weapons based on those technologies (Del Monte, 2017: 200–201). Thirdly, official documents on directions of development in the field of nanotechnology and plans for its military application are publicly available.

Nanotechnological Normative and Institutional Framework of the Development of US Military Capabilities

According to a decade and a half old prediction of a futurologist James Canton, who is influential in political circles as well in his capacity as many decade adviser in the White House, nanotechnology-based products play the role of one of four drivers of innovation economy at global scale (Kanton, 2009: 104-105), having the potential to start a new industrial revolution with all-encompassing consequences for the way of designing and producing. As early as in 2000, the administration of US President Bill Clinton launched the National Nanotechnology Initiative, and the Congress adopted it in 2003, and passed 21st Century Nanotechnology Research and Development Act). The Act established the National Nanotechnology Programme, which falls under the responsibility of the president and the National Science and Technology Council to ensure a state-level effective coordination in installing required infrastructure, running research projects, and commercialisation of applicable scientific finds and technological innovations (21stCNRDA, 2003). The Act also envisages long-term budgetary investments necessary to ensure the US global leading position in the field of nanotech-

nologies through the enhancement of productivity and competitiveness of US industry, accelerated establishment of *start-up* companies, and encouragement of interdisciplinary research and programmes of specialised and vocational education (21stCNR-DA, 2003: 1923–1925). The current National Nanotechnology Initiative Strategic Plan, adopted in 2021, reiterated the priority objectives from previous plans (NNISP, 2021).

The volume of budgetary funds intended for financing nanotechnological projects of several governmental agencies has been many times multiplied as early as in the first several years of that Act application (Andersson, 2008: 95). The budget line of 2.16 billion dollars, earmarked for the National Nanotechnology Initiative for 2024 is the largest so far individually observed, and in almost two and a half decades, 43 billion dollars were allocated for that purpose (NNIFY24, 2024: 5). The same trend occurred within the European Union and in leading Asian countries. Therefore, it comes as no surprise that, at present, there are almost four thousand scientific laboratories and development centres worldwide, both in public and private sector, that conduct research in this field (Nanowerk, 2024).

The core of the institutional framework for the development of advanced military capabilities consists of four leading governmental agencies within US defence sector responsible for the conduct of transdisciplinary primary and applied nanotechnological scientific and developmental projects. These are:

- US Army Research Office. Founded in 1951, as an organisational unit of the US Army Combat Capabilities Development Command Army Research Laboratory (DEVCOM ARL), tasked to direct scientific discoveries towards the use in the development of new military capabilities, encourage finding solutions to existing technological requirements of the military, and to speed up the transfer of the results of civilian primary research into military applied research. The Office selects research and development projects whose creators are the scientists and engineers from prestigious institutes and universities. It funds them since they have the potential to be applied for military purposes in following 20 to 30 years (AROYR 2022, 2022: 5).
- Institute for Soldier Nanotechnologies. It was established in 2002 as a joint venture of the Pentagon and the prestigious Massachusetts Institute of Technology (MIT), with the task to apply nanotechnology in the field of materials, quantum science, energy technology, electronics and photonics, to enhance the protection, survivability, and capabilities of combatants, as well as to design equipment and auxiliary systems (ISN, 2024a).
- The US Navy Research Laboratory's Institute for Nanoscience. It was established in 2003 and tasked to conduct research that link quantum and neuro-morphic computing, nanophotonics, nanobiotechnology and energy technology (Institute for Nanoscience, 2024).
- Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). It was founded in 1958 its mission being to create preconditions, by networking leading scientists-innovators as individuals, research centres from different universities and companies, for the transformation of revolutionary concepts into products that can be practically utilised for the needs of national security (DARPA, 2024).

The Fields of Current and Potential Military Application of Nanotechnologies

The military application of nanotechnologies should lead to a higher degree of personnel protection in combat operations, higher lethality of weapons (for example, explosive devices), greater durability of materials and devices, construction of microdevices (nano drones and nano robots), and the creation of a hybrid form of chemical-biological weapon. In the area of the enhancement of performances of combat aeroplanes, vessels, and land vehicles, in the very beginning of 21st century, there was a plan to direct US research-development and construction efforts towards multifunctionality, reduced weight, and easier manoeuvring, unmanned remote guiding, reduced thermal, radar, and acoustic visibility, operability based on sensor and intelligence information and their wireless transfer, operational adaptability to changing environmental circumstances, self-repair, energy efficiency, and impenetrability against enemy fire engagement (Simonis & Schilthuisen, 2006: 25–32). The purpose of the said Pentagon's planned activities is to make future combat systems self-sustainable, more mobile, flexible, durable, lethal, and more sustainable in terms of communication-information and logistics (Simonis & Schilthuisen, 2006: 44).

Advanced Materials

The most obvious step forward in nanotechnology, in terms of structure control at atomic and molecular level, can be observed in the field of materials, or the materials science. Because of that, the improvement of materials, vital for arms, military equipment and vehicles, represents the area of nanotechnology application in the development of US defence capacities where practical short-term and mid-term results are expected. This is the result of a growing domination over materials reflected in the capability of scientists and engineers to artificially stimulate electrons to manifest quantum properties and enable usable electric, optical, magnetic and thermodynamical behaviour of solid materials (Rogers et al., 2015: 89–124).

US Army Research Office made a step forward in detecting electronic, optoelectronic and thermal properties of mineral perovskite, which could in near future play a decisive role in the replacement of silicon as the main semiconductor in computers (AROYR 2022, 2022: 61–63). In addition, the possibilities for laboratory creation of crystal microstructure of that mineral have pointed to its excellent responsiveness in infrared segment of the spectrum, suitable for the improvement of night vision devices and sensors. In efforts oriented towards revolutionising microelectronics and computer technology, the US Navy Research Laboratory's Institute for Nanoscience works on introducing photonic integrated circuits, which function by way of bringing light directly on semiconductor, the mass production of which would lead to a sudden development of radar signals high-frequency processing (NRL, 2024: 3). The Institute develops a chip design as the component of future neuromorphic processors, and endeavours to find ways to make independent silicon "neurons" "learn" to perform

concrete functions modelled after the learning process of human brain neurons (NRL, 2024: 5). Also, Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) has achieved significant results in integrating the best properties of photons and electrons in an electronic circuit, which enables a huge breakthrough in the advancement of military capabilities for positioning and navigation in an environment without GPS support, three-dimensional mapping, and high-speed communication systems (EPIC, 2024). In 2023, the Agency launched a research programme to create synthetic quantum nanostructures (SynQuaNon), so that the design of synthetic metamaterials, resilient to high temperatures of work of nano electronic devices, based on superconductors, would solve the problem of great energy needed to cool those devices, and stabilise information processing at quantum level of precision (DARPA, 2023).

Carbon nanotubes and diamond coatings and fibres have a higher ratio of strength to weight than steel, which enables a lighter and more resilient armour, as well as parts for vehicles and aircraft (Carafano & Gudgel, 2007). For example, any land vehicle would thus be better protected against enemy explosive devices and small-calibre arms. The manipulation of certain materials at nano level produces an optical effect of negative refraction of light, i.e. it artificially bends light at angles and directions otherwise impossible in nature (Carafano & Gudgel, 2007). That procedure could contribute to the design of light-bending camouflage, so one could see for example a soldier or vehicle moving. The basic idea is to make land vehicles, aircraft, and military ships both lighter and stronger, which would considerably reduce the consumption of fuel and increase the speed and range of movement (Hilton, 2022b). In the field of increasing energy value of fuels, cells with solid oxide can produce more energy than conventional fuels, while nanoparticles added to fuel can enable higher speed and broader operational range of jet planes, tanks, and ships (Hilton, 2023).

As regards the improvement of ballistic vest design, nanotechnologies will make progress in comparison to present results achieved using synthetic material made of the mixture of para-aramid fibres also known as kevlar, which is still relatively heavy (some 14 kg) and thus inconvenient to be worn in combat actions (Hilton, 2022b). Because of that, efforts of scientists, technologists and manufacturers of synthetic fibres are oriented towards the experiments that should point to optimal directions of constructing reinforced materials by merging traditional natural materials and carbon nano-materials to achieve the properties of higher elasticity at the impact of a high-speed projectile and the smaller weight of the material itself at the same time. Carbon nanotubes are more than hundred times more resilient than steel additionally reinforced by different alloys (Olabi & Grunwald, 2007), while magnetorheological fluid (MR fluid) is the liquid with the property of changing viscosity with the application of magnetic field force. With the change of magnetic field, magnetorheological fluid can change from solid to liquid and vice versa, which enables constructing ballistic vests adaptable to changing conditions of combat operations (Olabi & Grunwald, 2007).

The purpose of ballistic vests is not only to prevent a bullet or shrapnel from penetrating soldier's body, but to transfer the kinetic energy of the very impact against the tissue, since that as well, in certain circumstances, can lead to fatal outcome. Recently, a material has been developed which, because of its high efficiency in absorbing mechanical energy, measured by gram, can ensure better protection of human organ-

ism against different types of impact (fall, explosion, vibration) in the way that its hydrophobic molecular structure in the form of a “nanocage” receives the impact, which is followed by its spontaneous displacement (Sun et al., 2021). Additional advantage of that material, which possesses liquid properties, is the possibility to be reused after the impact, since it can absorb multiple impacts, which is particularly suitable for military application in the construction of armours and protection of vulnerable infrastructure. This is a significant step, having in mind the properties of present materials regarding the absorption of mechanical energy that rely on plastic deformations, cell bending and highly elastic dissipation, being able to withstand only one impact. The researchers of the National Institute of Standards and Technology and Columbia Engineering company have managed to find the way to reinforce natural materials using nanoparticles of silicon dioxide coated by polymer threads (Chen et al., 2021). That innovation has created the capability of the new material to disperse, to much greater extent, the energy released in the point of ballistic impact, which will play a considerable role in designing protective layers on satellites and spacecraft that are exposed to continuous impacts of micro-fragments circling the Earth’s orbit at very high speed. The synthesised coating will provide additional strength to traditional materials (glass, plastic, metal, and kevlar) when they are exposed to hostile fire action.

For many years, laboratories are examining the ways to achieve radar and sonar invisibility of military aircraft, vessels and submarines. To fully prevent or at least mitigate the performance of new sensor detection technologies, camouflage paints, paint additives, tarpaulins, nets, and foams were developed for the purpose of visual camouflage and suppression of thermal and radar traces. Specific electromagnetic, thermal, chromogenic, and mechanical properties of low-conspicuity materials, or the so-called stealth materials, should contribute to jamming sensors when detecting objects by catching transmitted or reflected electromagnetic radiation from their surface. Researchers and engineers are expected to develop protective coating that will change the characteristics of reflection, absorption, and dispersion of electromagnetic radiation in visible, infrared, and microwave segments of the spectrum.

In the range of promising nanotechnological achievements with potential for military use, particularly important is the engineered manipulation of materials at nano level to enhance physical properties of various surfaces, add new properties, and find their new functions for practical use. On external surfaces of vehicles, aircraft, vessels, and weapons, the focus of research and engineering innovation is based on the development of nanoceramics and metal alloys, and special superhydrophobic coatings with waterproof, anti-corrosion, no-frost, and friction-reducing properties

Explosives and their detection

As regards the improvement of explosives efficiency, nanotechnologies should bring more precise control of explosive devices’ detonation, while the molecular structure of explosive material would be rearranged in laboratories resulting in an optimal ration of particles and ingredients mixture, which would then enable the maximisation of released energy at the blast (Carafano & Gudgel, 2007). Such outcome would

represent a huge progress given that today's explosives are very difficult to test, especially those for specific combat uses. The progress in the field of ballistics relating to the use of nanomaterials would enable many times more devastating power of a much smaller quantity of explosive mass, which would be packed in projectiles of smaller dimensions. That would result in smaller yet much more lethal bombs, missiles, war heads, and other types of explosive devices, and just as much improved capability of breaching armours or bunkers. Furthermore, there are expectations that in the far future, micronuclear bombs will be designed, the mass of which would be between one and two kilograms, but with explosive power measured by tens of tons of conventional explosive (Hilton, 2023). The control of the size of nanoparticles in explosives would enable the control of detonation speed and its dispersal, and for a decade now, the work has been done on the creation of directed detonation at cellular level as the method of removal of carcinogenic cells in human organism (Chaban, 2015). The mechanism of directed detonation is based on precise guidance of a nono bomb in the form of a particle that "explodes" in the way that it releases energy by stimulating momentary decomposition, or the brake of internal atomic links.

For more than two decades research has been carried out under the auspices of the US Navy Research Laboratory's Institute for Nanoscience to integrate the application of artificial intelligence and nanotechnologies in designing sensors for the detection of explosive volatile organic compounds modelled after the sharp sense of smell of grasshoppers (Hamisevicz, 2024). The idea is to create a one-of-a-kind "electronic nose" in the form of a mobile device with integrated artificial intelligence with a long string of chemical sensors with nanoparticles. The sensors would be used to produce a massive database of traces of different explosive vapours, taken at different concentration levels to enhance evaluation efficiency of future explosive detectors. The institute has designed a device for contactless locating and identification of a range of toxic chemicals (NRL, 2024: 25). The Institute for Soldier Nanotechnologies has constructed a high-sensitivity chemical sensor for remote detection of explosives, based on nanostructured intensifying fluorescent polymers (ISN, 2024b), while the scientific achievements of the Defense Advanced Research Projects Agency in the field of quantum physics should further enhance the precision of the sensors (QSC, 2024).

Nano Drones and Nano Robots

In the beginning of 21st century, the conceptualisation of nano drones started that would - together with an integrated global positioning microsystem (GPS), antenna, flight control system, and satellite communication system based on the Internet of Things (IoT) - make the backbone of reconnaissance and observation operations of US armed forces. The further progress in unmanned aerial vehicle technology opens possibilities for the production of the so-called artificial flying insects, i.e. Nano unmanned aerial vehicles (NUAV) that could approach enemy positions undetected, for example in a building, and gather intelligence or engage the enemy. Such unmanned aerial vehicles would play a significant role in urban environment warfare scenarios since the application of biomimetic design would render them less conspicuous near

enemy troops. For example, one of highly probable combat scenarios envisages the combat engagement of a large swarm of tiny, therefore, difficult to shoot down, nano drones that would by their joint action multiply their devastating power if directed towards some high-value concentrated target, for example, command staff, ammunition or fuel storage. The transformation of nano drones into nano robots will be possible only with the development of full autonomy properties, or when those military devices would possess integrated capabilities of observation, artificial intelligence and autonomous execution of selected options of action (the so-called three fundamental principles of robotics). Because of that, no less than two decades ago it was clear that the use of nano robots in land and naval operations would be possible only with the increase in the power of processors of future quantum computers and memory capacity of nano electronics, reduced weight of mechanical structures and the enhancement of mobile sources of electric power (Simonis & Schilthuizen, 2006: 58–59). The operational use of nano robotic systems is conditioned by the possibility of networking with a combatant and commander, who can then, in real time, analyse data gathered by nano robots.

The main issue that constructors and technologists must resolve is how to build sufficiently strong yet miniature power supply to enable operationally relevant reach to the “flying insects”. A step forward in the enhancement of the strength of power supply in relation to its weight is the prototype of a portable generator Mesodyne LightCell, based on the use of nano structured geometry of photon crystals for the modification of the normal density of the state of photons (ISN, 2024). That generator is expected to enable prolonged operation to combat systems whose weight represents a critical factor, especially to military robots, unmanned aircraft, and soldiers at prolonged combat tasks (ISN, 2024).

Microsatellites

Today, satellites are almost irreplaceable devices that perform civilian tasks in the field of remote gathering of diverse data, telecommunication, television broadcasting, and global positioning, as well as tasks of gathering intelligence, observation, and targeting in the domain of global projection of US military power. The feasibility of threats of disabling or destroying satellites grows parallelly to the development of high-range directed energy weapons, i.e. high-power lasers or microwaves, and the improvement of precision of anti-satellite projectiles. Because of that, owing to the great progress made in micro-processor technology, classical satellites will in the near future be replaced by micro-satellites, because they will be of much smaller dimensions (1 dm³ in average) and therefore lighter and more energy-efficient (Simonis & Schilthuizen, 2006: 63). Hence, the microsatellites will be cheaper for serial production and positioning in the Earth's orbit in swarms, because their joint action will be made possible by wireless connection established among them. The swarms of networked microsatellites will with greater precision perform tasks of detailed high-resolution observation and gathering intelligence on enemy operations, and they will also be used to destroy enemy satellites (Simonis & Schilthuizen, 2006: 63). It will be possible to attach micro-

satellites to large satellites without detection so that they can destroy their important parts or disrupt their work, while microsatellites' miniature dimensions will make enemy engagement against them difficult.

Soldier as a Biotic-Abiotic Interface

The development of military application of nanotechnologies is also focused on enabling US soldiers to be a highly lethal and self-sustainable combat entity, strengthened by artificial intelligence and microsystem that monitors bodily functions, and protected against ballistic, biological and chemical enemy impacts (Simonis & Schilthuisen, 2006: 41–51). The soldier of the future is envisioned as a one-of-a-kind combat biotic-abiotic interface, capable of effectively networking its bodily functions with the equipment. This is a concept of the “wireless soldier”, equipped with advanced technical system (Body Area Network) made of several networked devices - mobile phone, wrist watch, “smart” helmet with a visor and mini screen, small headphones, arms and different sensors integrated in the uniform and the body itself (bionic chips). The “wireless soldier” would be networked with the responsible command, and he would exchange information in real time about the execution of the assigned combat task with his superior commander and fellow warriors (Hilton, 2023). In that way, the combatant would at any moment be aware of his own position and the disposition of his fellow warriors in changing and unpredictable conditions of conducting combat operations (the so-called fog of war), as well of his physical and mental state. Also, the soldiers would, in real time, gather relevant information from the theatre and send them to their command for the better-quality decision-making on the further direction of the combat operation.

A persistent problem of designing military uniform is how to prevent the numbing of soldiers' extremities, and consequently the decrease in combat performance. Recent research conducted by US chemists from the Stanford University showed that silver nano threads interwoven with cotton fabric can warm it up, if low voltage current is passed through them (Nano, 2017). Currently, there are experiments being conducted with polyester fabrics and the mixture of cotton and nylon with integrated nano threads and hydrogels to make the fabric suitable for a uniform that would preserve the heat and be comfortable in extremely cold weather conditions, and prevent sweat from permeating through the rest of the wardrobe (Nano, 2017). Advanced fabrics would enable a thinner, thus lighter winter uniform, and soldiers could regulate its heating or it would have an automated body temperature control mechanism that would cool down or heat up the soldier in accordance with weather conditions (Hilton, 2022a). In that way, a soldier could adjust body temperature himself to “immerse” himself in the temperature of the surrounding terrain, thus avoiding being easily detected by enemy thermal cameras (Hilton, 2022a).

The future US soldier will have a uniform resilient to all types of enemy impacts - bullets, fragments of activated explosive devices, biochemical agents and other. Nanotechnology will enable integrated sensors on labels and integrated networks of nano fibres with the capacity to absorb, deactivate and decontaminate chemical and

biological weapons, and their use in radioactivity detection is likely (Hilton, 2023). The uniform will possess the capability of adaptable camouflage by changing pattern to blend with the terrain. Nanomaterials with chromogenic properties, i.e. changing colours with the change of external stimulants, such as light, heat, electrical or magnetic field, will probably be used for making adaptable camouflage. Soldiers' boots will have embedded plates for radio frequency identification (RFID) for the control of access, positioning and gathering and analysis of different agents in the soil. For more than a decade, the US Navy Research Laboratory's Institute for Nanoscience has been developing new materials through functional merging of biological molecules with nano particles, to pave way for further breakthroughs in gathering energy for enhanced capabilities of combatants (McKinney, 2014).

For two decades, a model has been developed for the application of implants in the form of nano machines injected into soldier's body as part of the system for dynamic monitoring of his activities in combat action (Altman & Gubrud, 2004). Each soldier would be marked by identification tags on the basis of the nano machine injected into his body, and the command would be able to track his movement 24 hours a day, and monitor in real time the data about the state of his bodily functions (for example excreted sweat, heart rate, blood pressure, blood sugar level, and oxygen content), food and water intake, speed of walking and running, and the severity of injuries. The advanced generation of nano robots will be made of textile and elastic polymers to adhere to body allowing movement as comfortably as possible. All gathered data about the state of bodily functions, and data about how the soldier manages pain and fear, would be analysed by artificial intelligence so that the responsible command could make more precise and quicker decisions. .

Conclusion

The increased number of nanotechnological programmes and projects under financial and institutional auspices of the state and Department of Defense, which happened in the previous decade and a half, marked the acceleration of a new race directed towards gaining as good position as possible in the global struggle for military technical supremacy. Despite currently being put aside due to the revival of nuclear threat caused by the escalation of the war in Ukraine, in all likelihood that race will reshape the warfare horizon in 21st century. The reason behind the acceleration of the new armament "spiral" lies in the assessments that the embodiment of nanotechnological solutions in warfare, in keeping with present visions and innovation plans, would represent such a great step forward in the modernisation of military capabilities that the state that achieves this first would be able to almost entirely degrade military potentials of its adversaries.

The analysis of this paper refers to achieved and anticipated breakthroughs of primary and applied nanotechnological scientific and developmental projects with potential military use in the USA, particularly in the fields of advanced materials, explosives and their detectors, nano drones and nano robots, microsatellites and soldiers-cyborgs. The review of the paper content, goals set and results obtained so far point

to the fact that the concrete military application of the majority of nanotechnological achievements are still reserved for the future - near or far. Additional limitation relates to the fact that the largest number of achieved innovations offer solution to rather specific problems. The outcome of nanotechnological efforts made so far is still of fragmentary nature observed from the perspective of a political goal of all-encompassing modernisation of US armed forces. The next step - mutual linking of performances of various nanotechnological solutions that would cumulatively systemically respond the need to enhance military capabilities - has not been made yet. Media spun excitement about alleged nanotechnological breakthroughs in military application slowly dies down due to the absence of mass production of nanomaterials with unique properties and devices with considerably improved performances.

Political decision-makers often indulge in unfounded techno-optimism, given that through marketing manipulation that can easily be transformed into good-sounding preelection promises. In the meantime, for example, the very US concept of military affairs revolution suffered serious criticism in academic and professional circles (see Collins & Futter, 2015) so in previous two decades the word "revolution" was removed from official terminology and replaced by the expression "military transformation". Though the USA will continue investing in research and development, it seems that initial hopes and expectations will not be fulfilled linearly. On the contrary, the application of the fruits of technological progress is closely linked to their market and use value, so it is important to take into consideration the decelerating element in the form of lacking technical understanding of the limitations and their social implications. Deepened research into offensive and defensive possibilities of nanotechnological achievements in the USA would be rather useful from the aspect of national military science and defence policy planning, as a part of an analytical attempt to timely and accurately interpret and predict the implications, especially in the circumstances when it would be difficult to find a symmetric response to possible projection of such advanced military power.

Bibliography

- [1] [21stCNRDA] 21st Century Nanotechnology Research and Development Act (2003, December 3). 108th Congress (2003–2004). <https://www.congress.gov/bill/108th-congress/senate-bill/189/text>.
- [2] Altmann, J., Gubrud, M. (2004). Anticipating military nanotechnology. *IEEE Technology and Society Magazine* 23 (4): 33–40.
- [3] [AMS 2019] The 2019 Army Modernization Strategy (2018). U.S. Army. https://www.army.mil/e2/downloads/rv7/2019_army_modernization_strategy_final.pdf.
- [4] Andersson, K. (2008). *Transparency and Accountability in Science and Politics: The awareness principle*. Basingstoke & New York: Palgrave Macmillan.
- [5] Army of 2030 (2022, October 5). U.S. Army. <https://www.army.mil/article/260799>.
- [6] [AROYR 2022] Army Research Office Year in Review 2022 (2022). U.S. Army Combat Capabilities Development Command Army Research Laboratory (DEVCOM ARL). <https://arl.devcom.army.mil/wp-content/uploads/sites/3/2023/06/ARO-YEAR-IN-REVIEW-2022-WEB-FINAL.pdf>.
- [7] Carafano, J., Gudgel, A. (2007). Nanotechnology and National Security: Small Changes, Big Impact. The Heritage Foundation. <https://www.heritage.org/defense/report/nanotechnology-and-national-security-small-changes-big-impact>.
- [8] Chaban, V. (2015). Spotlight: Nanoscale Bombs. Homeland Defense and Security Information Analysis Center (HDIAC), U.S. Department of Defense. <https://hdiac.org/articles/spotlight-nanoscale-bombs/>
- [9] Charan, R. (2022, September 19). What Defines a Successful Organization? *Harvard Business Review*. <https://hbr.org/2022/09/what-defines-a-successful-organization>.
- [10] Chen, S. H., Souna, A. J., Stranick, S. J., Jhalaria, M., Kumar, S. K., Soles, C. L., Chan, E. P. (2021). Controlling toughness of polymer-grafted nanoparticle composites for impact mitigation. *Soft Matter* 22: 256–261.
- [11] Cohen, E. A. (1996). A Revolution in Warfare. *Foreign Affairs* 75 (2): 37–54.
- [12] Cohen, R. S., Chandler, N., Efron, S., Frederick, B., Han, E., Klein, K., Morgan, F. E., Rhoades, A. L., Shatz, H. J., Shokh, Y. (2020). *The Future of Warfare in 2030: Project Overview and Conclusions*. Santa Monica: RAND Corporation.
- [13] Crevel, M. V. (2000). *The Art of War and Military Thought*. London: Cassell & Co.
- [14] Dahl, E. J. (2002). Network Centric Warfare and the Death of Operational Art. *Defence Studies* 2 (1): 1–24.
- [15] DARPA (2024). About DARPA. Defense Advanced Research Projects Agency. <https://www.darpa.mil/about-us/about-darpa>.
- [16] DARPA (2023). Embarking on Quest for New Quantum Materials. Defense Advanced Research Projects Agency. <https://www.darpa.mil/news-events/2023-08-09-a>.
- [17] Del Monte, L. A. (2017). *Nanoweapons: A growing threat to humanity*. Lincoln (NB): Potomac Books.
- [18] Dombrowski, P., Gholz, E. (2006). *Buying military transformation: technological innovation and the defense industry*. New York: Columbia University Press.

- [19] Dong, H., Gao, Y., Sinko, P. J., Wu, Z., Xu, J., Jia, L. (2016). The nanotechnology race between China and the United States. *Nano Today* 11 (1): 7–12.
- [20] [EPIC] Electronic & Photonic Integrated Circuit Program (2024). Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). https://www.darpa.mil/attachments/EPIC_Layout_final.pdf.
- [21] Gray, C. (2005). *Another Bloody Century: Future Warfare*. London: Weidenfeld & Nicolson.
- [22] Guzzetti, L. (2010). Global war and technoscience. Y: Alessandro Dal Lago, Salvatore Palidda (упед.), *Conflict, Security and the Reshaping of Society: The civilization of war* (стр. 84–100). Oxon & New York: Routledge.
- [23] Hamisevicz, M. (2024, March 6). NRL Researcher Awarded Grant to Study Nanotechnology Sensors. U.S. Naval Research Laboratory News. <https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/3697803/nrl-researcher-awarded-grant-to-study-nanotechnology-sensors/>.
- [24] Hilton, S. (2023). Developing Nanotechnology in the Defence Industry. Nano Chemi Group Blog. <https://blog.nanochemigroup.cz/developing-nanotechnology-in-the-defence-industry/>.
- [25] Hilton, S. (2022a). The Soldier of Tomorrow will Rely on Nanotechnology with His Life. Nano Chemi Group Blog. <https://blog.nanochemigroup.cz/the-soldier-of-tomorrow-will-rely-on-nanotechnology-with-his-life/>.
- [26] Hilton, S. (2022b). Nanotechnology and the Military: How Tiny Materials Can Win Wars. Nano Chemi Group Blog. <https://blog.nanochemigroup.cz/nanotechnology-and-the-military-how-tiny-materials-can-win-wars/>.
- [27] Institute for Nanoscience (2024). U.S. Naval Research Laboratory. <https://www.nrl.navy.mil/nanoscience/>.
- [28] [ISN] Institute for Soldier Nanotechnologies (2024a). Strategic Research Areas. <https://isn.mit.edu/strategic-research-areas>.
- [29] [ISN] Institute for Soldier Nanotechnologies (2024b). Grain Boundary-Engineered Nanocrystalline Metal Alloys. <https://isn.mit.edu/grain-boundary-engineered-nanocrystalline-metal-alloys>.
- [30] [ISN] Institute for Soldier Nanotechnologies (2024b). Ultrasensitive Explosives Detection. <https://isn.mit.edu/ultrasensitive-explosives-detection>.
- [31] [ISN] Institute for Soldier Nanotechnologies (2024r). Photonic Crystals to Control Light Radiation. <https://isn.mit.edu/photonic-crystals-control-light-radiation>.
- [32] Janković, S., Mitić, A. (2024). Competing Visions of World Order: How China, the US, the EU and Russia Conceive the Transition to Multipolarity. Y: Dušan Proroković, Paolo Sellari, Rich Misfud (упед.), *Global Security and International Relations after the Escalation of the Ukrainian Crisis*, 102–131. Belgrade, Rome, Clarksville: Institute of International Politics and Economics, University of Belgrade – Faculty of Security, Sapienza University, Austin Peay State University – Department of Political Science.

- [33] [JOE 2035] Joint Operating Environment 2035: The Joint Force in a Contested World (2016, July 14). Joint Chiefs of Staff, U.S. Army. Washington, D.C. https://www.jcs.mil/Portals/36/Documents/Doctrine/concepts/joe_2035_july16.pdf.
- [34] Kanton, Dž. (2009). *Ekstremna budućnost*. Beograd: Clio.
- [35] Kostić, M. (2018). Čija hegemonija? – svet u uslovima takmičenja za novu globalnu vladavinu. *Međunarodni problemi* LXX (4): 391–411.
- [36] Krepinevich, A. F. & B. D. Watts (2014). *The Last Warrior: Andrew Marshall and the Shaping of American Defense Strategy*. New York: Basic Civitas Books.
- [37] McKinney, D. (2014, August 12). Dr. Igor Medintz Honored with 2013 Arthur S. Flemming Award. U.S. Naval Research Laboratory News. <https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/2554573/dr-igor-medintz-honored-with-2013-arthur-s-flemming-award/>.
- [38] Mills, M. A., Mills, M. P. (2014). The Invention of the War Machine: Science, technology, and the First World War. *The New Atlantis – A Journal of Technology & Society* 42: 3–23.
- [39] [Nano] (2017, August 21). Nanotechnology could keep soldiers warm. *Nano – The Magazine for Small Science*. <https://nano-magazine.com/news/2017/8/21/nanotechnology-could-keep-soldiers-warm?rq=soldier>.
- [40] Nanowerk (2024). Nanotechnology Company & Research Labs Directory, 8 October. https://www.nanowerk.com/nanotechnology/research/nanotechnology_links.php.
- [41] [NDS] National Defense Strategy (2022, October 27). U.S. Department of Defense. Washington, DC. <https://media.defense.gov/2022/Oct/27/2003103845/-1/-1/1/2022-NATIONAL-DEFENSE-STRATEGY-NPR-MDR.PDF>.
- [42] [NDSTS] National Defense Science and Technology Strategy 2023 (2023). U.S. Department of Defense. Washington, DC. <https://www.cto.mil/wp-content/uploads/2023/05/2023-NDSTS.pdf>.
- [43] Nichols, G. (2017). Nanotechnology & the New Arms Race. *HDIAC Journal – Journal of the Homeland Defense & Security Information Analysis Center* 4 (2): 18–23.
- [44] [NNIFY24] National Nanotechnology Initiative Supplement to the President's 2024 Budget (2024, March). Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering, and Technology, Committee on Technology, National Science and Technology Council. https://www.nano.gov/sites/default/files/pub_resource/NNI-FY24-Budget-Supplement.pdf.
- [45] [NNISP] National Nanotechnology Initiative Strategic Plan (2021, October). A Report by the Subcommittee on Nanoscale Science, Engineering, and Technology, Committee on Technology, National Science and Technology Council. https://www.nano.gov/sites/default/files/pub_resource/NNI-2021-Strategic-Plan.pdf.
- [46] [NRL] 25 Technologies for the Next 25 Years (2023–2048) (2024, April). U.S. Naval Research Laboratory. https://www.nrl.navy.mil/Portals/38/PDF%20Files/25%20for%2025%20Booklet_FINAL.pdf?ver=1a5kY1mPqK1JpzBllaWuew%3d%3d×tamp=1713356065667.

- [47] [NSS] National Security Strategy (2022, October 12). White House. Washington, DC. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/10/Biden-Harris-Administrations-National-Security-Strategy-10.2022.pdf>.
- [48] Olabi, A. G., Grunwald, A. (2007). Design and application of magneto-rheological fluid. *Materials & Design* 28 (10): 2658–2664.
- [49] Rogers, B., Adams, J., Pennathur, S. (2015). *Nanotechnology: Understanding Small Systems* [Third Edition]. Boca Raton (FL): CRC Press.
- [50] [QSC] (2024). Quantum Sensing and Computing. Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). <https://www.darpa.mil/attachments/QuantumSensingLayout2.pdf>.
- [51] Simonis, F., Schilthuisen, S. (2006). *Nanotechnology: Innovation opportunities for tomorrow's defence*. Amsterdam: TNO (Nederlandse organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek), Future Technology Center.
- [52] Sun, Y., Rogge, S. M. J., Lamaire, A., Vandenbrande, S., Wieme, J., Siviour, C. R., Van Speybroeck, V., Tan, J. (2021). High-rate nanofluidic energy absorption in porous zeolitic frameworks. *Nature Materials* 20: 1015–1023.
- [53] The Army Strategy (2018). U.S. Army. https://www.army.mil/e2/downloads/rv7/the_army_strategy_2018.pdf.
- [54] The Army Vision for 2028 (2018). U.S. Army. https://www.army.mil/e2/downloads/rv7/vision/the_army_vision.pdf?_st.
- [55] Wood, R., Walsh, C. (2013). Smaller, Softer, Safer, Smarter Robots. *Science – Translational Medicine* 5 (210). DOI: 10.1126/scitranslmed.3006949
- [56] Костић, М. (2008). Мрежноцентрично ратовање у теорији и пракси ОС САД. *Војно дело* LX (2): 175–199.
- [57] Хауард, М. (1999). *Пат у европској историји*. Београд: СКЦ.
- [58] Хаукрофт, Џ. (2008). Мрежноцентрично ратовање у Ираку 2003. године – искуства и поуке. *Војно дело* LX (4): 78–94.

Summary

The paper examines publicly available research output as well as technological innovations in nanoscience and nanotechnology brought into the context of the modernization of US military capabilities as to effectively maintain the increasingly contested global supremacy. The starting assumption is that the development of sophisticated military capabilities centred around achievements of the Fourth Industrial Revolution is a key component of building sustainable military power for the 21st century that can provide an effective global projection of force worldwide. Regardless of the recent breakthroughs in Chinese science and technology with potential application in the military, the author chose the United States as a case study because of its dominant role in pushing the frontiers of nanotechnology. In addition, the United States as the leading power in NATO represent a role-model for other national militaries in the West in terms of strategic, doctrinal, and organizational policies. The ongoing and

anticipated recomposing of global power in the early 21st century has accelerated the modernization of the US Army by designing innovative weapons and other military systems based on advanced technologies of the Fourth Industrial Revolution. All relevant strategic documents recognize advanced technologies as a central factor in competing in the international arena, pinpointing nanotechnology as an area with a high degree of projected positive impact of basic research on the modernization of military capabilities. The core government agencies within the US defence sector with responsibilities for the implementation of transdisciplinary fundamental and applied nanotechnology research and development projects are: 1) Army Research Office, an organizational unit of the U.S. Army Combat Capabilities Development Command Army Research Laboratory (DEVCOMARL), 2) Institute for Soldier Nanotechnologies, 3) Navy Research Laboratory's Institute for Nanoscience, and 4) Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). The analysis focuses on achieved and anticipated achievements with the potential for military application resulting from publicly available data on nanotechnology research and development projects covered by the defence budget, as well as on achievements presented in scientific and professional literature. The analysis includes advanced materials, explosives and their detectors, nano drones and nano robots, microsatellites, and cyborg soldiers. However, preserving the ability to effectively project military force in the international stage requires successful utilization of new weaponry, i.e. its effective incorporation into strategic and doctrinal planning as well as into decision-making processes on the battlefield. The assessment of the future cumulative impact of the analysed nanotechnological breakthroughs adaptive to military purposes is subject to numerous variables, and thus unreliable for rational decision-making as a component of military planning. It is less likely that the successful future transformation of nanotechnological accomplishments into concrete military capabilities would alone solve the problem of the erosion of US technological superiority over its global contesters. Despite an increased asymmetry at the expense of other great powers challenging the position of the US and possible challengers from the global periphery, nanotechnological superiority itself can hardly be achieved in a straight line, because strict requirements for the operational reliability of new weapons systems can be sacrificed by military-political motives for the fast introduction of new technology. The author concludes that in assessing the future utilization of current and expected breakthroughs in military nanotechnology, "nano mania" should be avoided, since the functional integration of sophisticated solutions into the military-strategic, operational and tactical framework is neither linear nor unambiguous, i.e. it does not in itself lead to greater effectiveness of military capabilities on the battlefield, or to an overwhelming advantage over the enemy.

Key words: *nanotechnologies, weaponry, warfare, defence policy, the military, US Armed Forces.*

© 2024 The Authors. Published by Vojno delo (<http://www.vojnodelo.mod.gov.rs>). This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



