



НАЦИОНАЛЕН ВОЕНЕН УНИВЕРСИТЕТ "ВАСИЛ ЛЕВСКИ"

ФАКУЛТЕТ „ЛОГИСТИКА И ТЕХНОЛОГИИ“

майор инж. ас. Веселин Георгиев Чиликов

**ПОВИШАВАНЕ
НА КАПАЦИТЕТА ЗА ИЗВЪРШВАНЕ НА
ИЗВЪНПЛАНОВИ РЕМОНТИ НА
ВЪОРЪЖЕНИЕТО И ТЕХНИКАТА В
БЪЛГАРСКАТА АРМИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

за придобиване на образователна и научна степен „доктор“

Област на висшето образование: 5. „Технически науки“

Професионално направление: 5.13. „Общо инженерство“

Научна специалност: „Колесни, верижни машини и логистика“

Научен ръководител: доцент д-р инж. Иван Николаев Миневски

Велико Търново

2025 г.

1. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯТ ТРУД

1.1. Актуалност на темата

Повишаването на капацитета за извършване на извънпланови ремонти е ключово условие за изпълнение на съюзническите задължения на Република България в рамките на НАТО и за изграждането на единна система за логистична поддръжка. Усъвършенстването на съществуващата ремонтна система трябва да създаде нови взаимодействия в областта на сигурността и да укрепи оперативните способности на въоръжените сили.

Недостатъчната оперативна съвместимост на системата за техническо обслужване и ремонт в Българската армия поставя на дневен ред необходимостта от адаптирането ѝ към съвременните условия и стандарти. Специфичните ремонтни дейности зависят пряко от нивото на научно-техническо развитие, внедряването на иновационни технологии и наличието на подготвен персонал.

Недостигът на специалисти по ремонт на въоръжението и техниката намалява способностите за поддръжка и води до невъзможност за ефективно решаване на възникващите проблеми. Високата степен на иновационно развитие е немислима без квалифициран личен състав. Заниженото ниво на подготовка се дължи на отслабената система за професионално образование и на липсата на устойчиво взаимодействие между образователните институции и ремонтните структури.

Актуалността на темата е пряко свързана с необходимостта от поддържане на боеспособността и оперативната готовност на техниката. Съвременни технологии като 3D принтиране и ЦПУ обработка предоставят нови възможности за бързо и ефективно възстановяване на критични компоненти, което съкращава времето за ремонт и намалява разходите. Внедряването на тези технологии в ремонтните бази на Българската армия ще повиши надеждността и дълготрайността на техниката, като едновременно с това ще намали зависимостта от външни доставчици и сроковете за доставка на резервни части.

Обект на изследването: Системата за войскови ремонт във въоръжените сили.

Предмет на изследването: Внедряването на съвременни технологии за ремонт и възстановяване на детайли чрез използване на 3D принтиране и ЦПУ обработка.

Цел на изследването: разработи ефективна методика за интегриране на съвременни технологии в извънплановите ремонти на В и Т.

Основни задачи:

1. Анализ на съществуващите методи и процедури за извънпланови ремонти.
2. Изследване на възможностите и предимствата на 3D принтирането и ЦПУ обработката за ремонт и възстановяване на критични детайли.
3. Създаване на CAD модели и провеждане на симулации за оптимизация на компонентите.
4. Провеждане на практически експерименти с изработените прототипи и анализ на резултатите.
5. Оценка на икономическата ефективност и приложимост на предложените методи в реалната ремонтна дейност на Българската армия.

Ограничения:

Фокусът е върху войсковия ремонт на верижна техника от състава на Сухопътните войски.

Методи:

1. Дескриптивен анализ на ремонтните формирания.
2. Експериментални изследвания.
3. Създаване и валидиране на CAD/CAM и физически модели.

Обем на дисертацията:

Дисертационният труд съдържа 156 страници, от които основният текст обхваща 140 страници, използваната литература – 5 страници, а приложенията – 11 страници. В текста са включени 6 таблици и 30 фигури. Използвани са общо 86 литературни и нормативни източника. По темата на дисертацията са публикувани 2 научни статии.

2. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД:

ГЛАВА ПЪРВА АНАЛИЗ НА СЪЩЕСТВУВАЩИТЕ СИСТЕМИ В БА И НАТО

1.1. Системата за ремонт на въоръжението и техниката в Българската армия и армиите на НАТО.

1.2. Интеграция на съвременни технологии в страните членки на НАТО

В резултат на извършения литературен обзор са формулирани следните изводи:

1. В ремонтните бази на Българската армия липсват стандартизирани процедури за внедряване на съвременни производствени технологии (3D принтиране и ЦПУ обработка). Необходимо е разработване и въвеждане на унифицирани стандарти и регламенти за тяхното прилагане.

2. Установен е дефицит на изследвания относно дълготрайността и надеждността на 3D принтираните и ЦПУ обработени компоненти в реални експлоатационни условия.

3. Налице е недостатъчно количество данни за икономическата ефективност и възвръщаемостта на инвестициите при внедряване на иновативни технологии в ремонтната дейност.

4. Липсват практически насоки за обучение и квалификация на персонала, работещ с технологии за 3D принтиране и ЦПУ обработка.

5. Целенасоченото обучение и подготовка на специалисти, съобразено с новите технологични изисквания, е ключов фактор за успешно внедряване на съвременни производствени методи в ремонтните системи на въоръжените сили.

ГЛАВА ВТОРА

СЪСТОЯНИЕ И АНАЛИЗ НА ТЕКУЩИЯ КАПАЦИТЕТ НА РЕМОНТНИТЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОТ СУХОПЪТНИТЕ ВОЙСКИ НА БЪЛГАРСКАТА АРМИЯ

2.1. Анализ на системата за снабдяване с резервни части на въоръжението и техниката

Снабдяването с резервни части е ключов елемент за осигуряване на ремонтно-възстановителната дейност във военните формирования. Материалните ресурси за Българската армия се приемат и съхраняват в базите на Командването за логистична поддръжка, откъдето се разпределят към формированията на видовете въоръжени сили. Дейностите по получаване, отчитане и бракуване на автобронетанковото имущество се регламентират със специализирани нормативни документи.

Снабдяването се извършва по два основни начина – от складовете на Министерството на отбраната и от търговската мрежа.

Анализът на съществуващата логистична система показва редица проблеми, оказващи пряко влияние върху поддръжката на техниката:

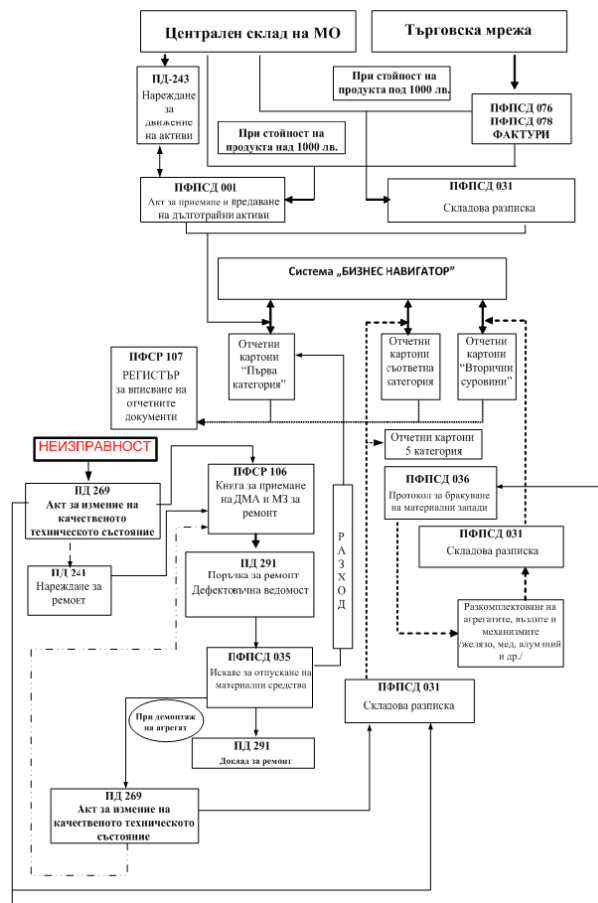
– Остаряла инфраструктура – голяма част от складовете и ремонтните съоръжения са проектирани за техника от ерата на Студената война и не отговарят на съвременните стандарти.

– Недостиг на резервни части – прекратените доставки за съветска техника и липсата на лицензирани производители водят до сериозни затруднения.–

Неефективно управление на запасите – отсъствието на интегрирани информационни системи затруднява планирането и бързата реакция.

– Зависимост от външни доставчици – част от необходимите части се внасят от чужбина, което удължава сроковете, намалява боеготовността и крие рискове, свързани с политическата обстановка.

С оглед на ускореното развитие на високоточните оръжейни системи и новите оперативно-процедурни изисквания, логистичната система трябва да бъде адаптирана така, че да осигурява навременна и ефективна поддръжка на формированията в различни условия на бойна обстановка. Това води до необходимост от технологични средства за паралелна поддръжка на внедрените стандарти.



Фиг.2.1. Алгоритъм за движението на материални средства.

2.2. Обща характеристика на ремонтно-възстановителните дейности

Ремонтно-възстановителната дейност представлява съвкупност от мероприятия, насочени към възстановяване на техническата годност на въоръжението и техниката с цел поддържане на необходимата оперативна готовност на формированията. В съвременните условия на динамична оперативна среда ремонтно-производствените процеси придобиват критично значение за осигуряване на непрекъсната функционалност на бойните системи.

2.3. Анализ на критични детайли и механизми – определяне на компонентите с висока честота на повреди

Военната техника на въоръжение в Българската армия се характеризира с висока издръжливост и опростена конструкция. Въпреки това, редица фактори водят до чести повреди и неизправности, налагащи извънпланови ремонтни дейности.

В рамките на настоящото изследване е извършен анализ и обобщение на данни за текущите ремонти от първа и втора степен за период от десет години (2013–2023г.). Резултатите са представени на таблица 2.1.

Таблица 2.1. Справка относно ремонтна дейност през период 2013-2023 г.

№ по ред	Военно формирование, извършило ремонта	Ремонт първа степен (брой)	Ремонт втора степен (брой)	Ремонт на агрегати (брой)	Забележка
1.	КСВ – ФОРМИРОВАНИЯ				
2013		107	2	1	Бронетранспортъори, Бойни машини на пехотата
2014		118	12	1	Танкове - Т – 72 , Бронетранспортъори, Бойни машини на пехотата, Самоходни оръдия и гаубици, Самоходни минохвъргачки, Самоходни реактивни системи, Командно-щабни машини за управление (КЩМ), Други самоходни бронирани сухопътни ППС снабдени с оръжейни установки
2015		202	11	-	Верижни влекачи
2016		198	9	-	Инженерни машини
2017		240	4	-	
2018		221	2	3	
2019		118	4	2	
2020		107	3	1	
2021		112	16	-	
2022		320	20	3	
2023		315	26	6	
2	РЕМ. ФОРМИРОВАНИЯ НА СВ. ЛП, РБВТ				
2013			98	8	
2014			103	9	
2015			123	13	
2016			120	18	
2017				12	
2018				16	
2019				14	
2020				20	
2021				23	
2022			150	31	
2023			162	26	
№ по ред	Военно формирование, извършило ремонта	Ремонт първа степен (брой)	Ремонт втора степен (брой)	Ремонт на агрегати (брой)	Забележка:
1.	Полк за лог. осиг.	300	512		ЗА ЦЯЛАТА РЕМОНТИРАНА ТЕХНИКА за период от 1 година
2.	Рем. база за В и Т	260	540		за период от 1 година

Справката е изготвена на основание Заповед ОХ–1029/15.10.2021 г., раздел II, чл. 69, ал. 1 и ал. 2, свързани с отчитането на неизправностите в електронното издание на „Книга за отчет на неизправните ППС“ и подадената информация на шестмесечна база от Командването на Сухопътните войски към дирекция „Логистика“ на Министерството на отбраната.

2.3.1. Класификация на ремонтните дейности

При анализа на ремонтните дейности в периода от 2013 г. до 2023 г. се установяват няколко основни критерии:

- брой на целите в ремонтната дейност и критерии за оптималност;
- взаимовръзка между оптималността и ограничителните условия, свързани с времето за отстраняване на аварийните ремонти;
- непредвидени фактори, оказващи влияние върху ефективността на ремонтните дейности.

2.3.2 Възможност за съкращаване на времето и разходите за ремонт

Анализът на ремонтно-възстановителната дейност показва, че методите и способите за извършване на ремонти се развиват динамично в зависимост от постъпващата нова техника и усъвършенстването на техническите средства, използвани при ремонтните процеси.

Отчитането на тези фактори, заедно с необходимостта от повишаване на квалификацията на ремонтния персонал, ще даде възможност за увеличаване на капацитета за извършване и овладяване на извънплановата ремонтна дейност в бъдеще.

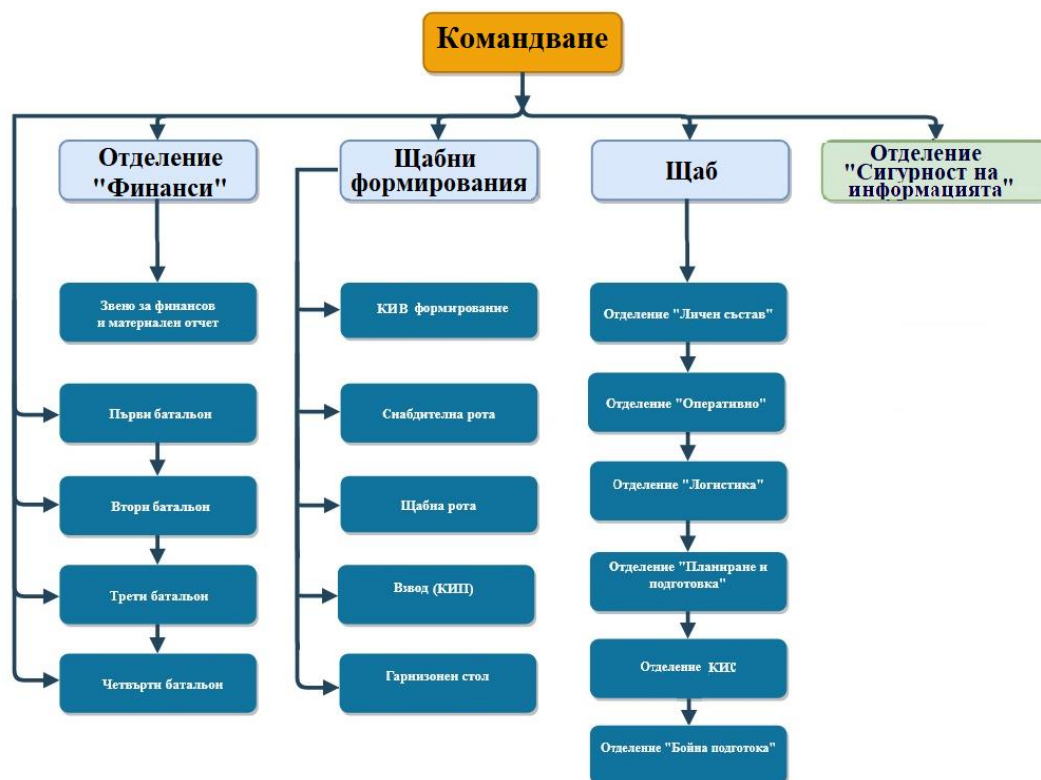
2.4. Капацитет на ремонтните формирования и налична инфраструктура – оценка на съществуващите условия за внедряване на нови технологии

Ремонтните формирования от състава на Сухопътните войски (СВ) на БА играят ключова роля в поддържането и възстановяването на въоръжението и техниката, въпреки ограниченията в техническите средства и недостига на резервни части.

Поддържането на наличното въоръжение и техника в работно състояние при тези условия е резултат от високоорганизирани усилия и адаптивност на ремонтните структури.

2.4.1. Полк за логистично осигуряване

От 1 юни 2008 г. Полкът за логистично осигуряване е реорганизиран и се явява правопреемник на създадената на 1 октомври 2000 г. На фигура 2.2 е представена организационната схема на Полка за логистично осигуряване.



Фиг. 2.2. Примерна структурна схема на Полк за логистично осигуряване.

Полкът за логистично осигуряване е предназначен да осъществява цялостното логистично осигуряване на подразделенията от състава на Сухопътните войски.

Ремонтните взводи на полка извършват ремонти от втора степен, като работят с готови агрегати. За поддържането на необходимите запаси от агрегати функционира специализиран взвод за ремонт и възстановяване на агрегати.

2.4.2. База за ремонт на въоръжение и техника – задачи и структура

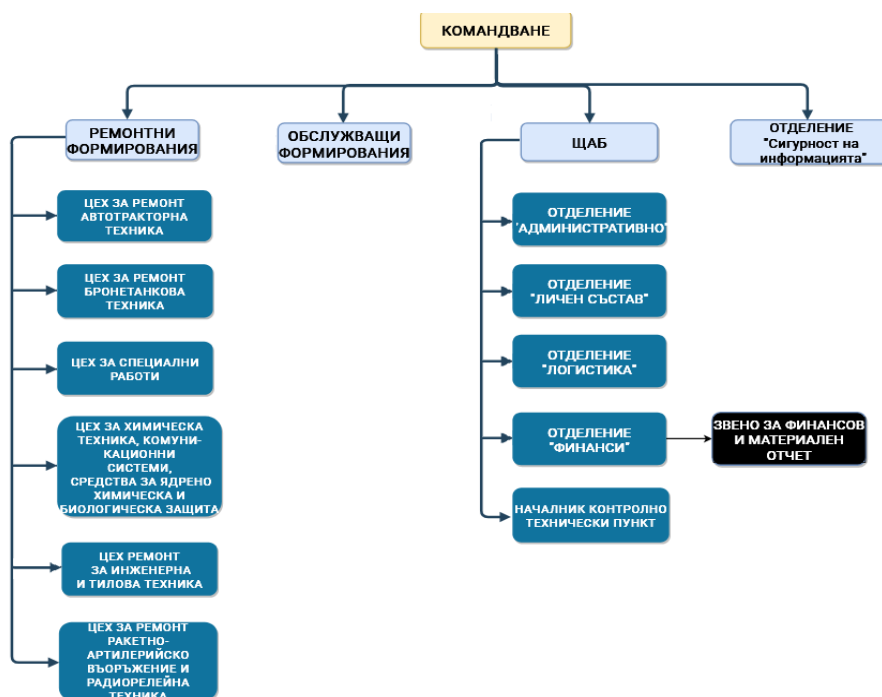
От 2006 г. военното формирование преминава на пряко подчинено към Командване на сухопътни войски (КСВ) на БА. Базата в мирно време притежава организационен статут на батальон, а във военно време се развърща по военновременни щатове като полк за ремонт на въоръжение и техника.

Организацията в мирно време е изградена на ротна основа, като всяка рота функционира в стационарни условия, оформена като цех. Основните структурни елементи са показани на фигура 2.3.

Технологичните възможности цеха за ремонт бронетанкова техника могат да бъдат класифицирани по следния начин:

- текущ ремонт II и III степен на танкове (капацитет: 1–2 танка месечно);
- текущ ремонт II и III степен на БТР, БРДМ и МТЛБ;

– текущ ремонт на агрегати на танкове (скоростна кутия, редуктор, странично предаване); – текущ ремонт на агрегати на МТЛБ и БТР (главни предавания, редуктори, раздатъчни кутии).



Фиг.2.3. Примерна структура на военното формирование.

2.4.3. Оборудване и технически възможности: Анализ на наличната апаратура за диагностика и ремонт, включително възможността за работа с ЦПУ машини и 3D принтери

Прегледът на възможностите за внедряване на съвременни производствени технологии, като ЦПУ машини и 3D принтери, показва, че модернизацията на ремонтната инфраструктура е главно условие за повишаване на капацитета за извършване на извънпланови ремонти.

Наличната апаратура в ремонтните формирвания към момента е насочена основно към осигуряване на текущи и средни ремонти на наличната техника, като съществува потребност от допълнително оборудване за автоматизирана обработка и бързо прототипиране на резервни части.

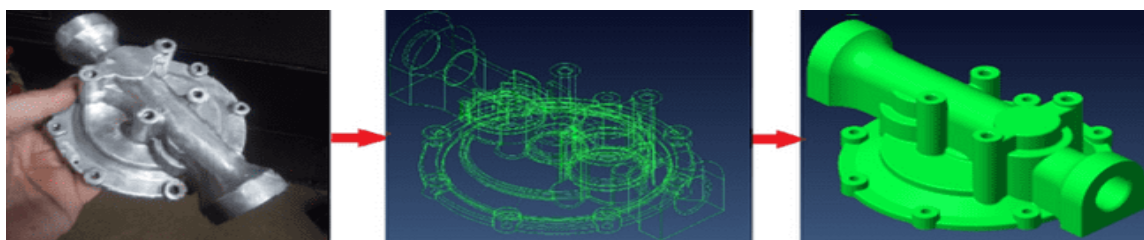
Използването на тези технологии ще позволи намаляване на времето за ремонт, оптимизация на ресурсите и повишаване на ефективността на ремонтно-възстановителните дейности.

2.4.4. Оценяване пригодността към автоматизация на производството

2.5. Сравнителен анализ на текущи методи и потенциални CAD и CAM решения

а) Обратно инженерство

Обратното инженерство представлява процес на възстановяване на проектната документация или триизмерния модел на съществуващ детайл чрез неговото физическо измерване и анализ. Този способ предоставя решение свързани с физическият модел, който на база измервания е основен източник на информация за CAD модела. Това също се нарича физически към цифров процес, изобразен на фигура 2.4.

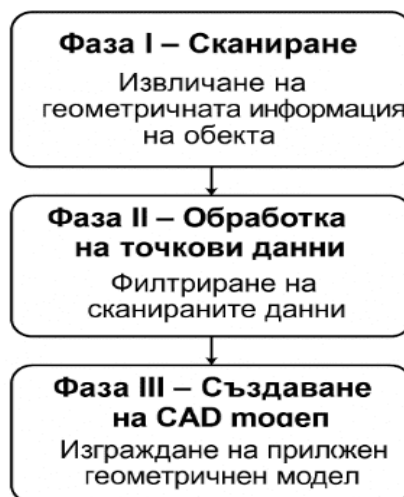


Фиг. 2.4. От физически детайл към цифров 3D обект.

б) Основни фази на обратното инженерство (РЕ)

Процесът на обратно инженерство включва три основни фази, чрез които се осъществява преход от физически детайл към цифров 3D модел, готов за анализ, модификация или възпроизвеждане.

Тези основни стъпки са представени схематично на фигура 2.5, която илюстрира трите ключови етапа на обратното инженерство и тяхната взаимовръзка за постигане на висока точност и функционалност на възстановените компоненти.



Фиг. 2.5. Схема на трите основни фази на обратното инженерство.

Индустриалните технологии са свързани с цифрово представяне на структурата на технически обекти с цел анализ, контрол на качеството или обратно инженерство. Те включват:

– индустриална компютърна томография – използвана за инспекция на вътрешни дефекти в метални и композитни части.

– оптична микротомография – приложима при изследване на микроструктури в материали.

– индустриални ЯМР системи – използвани по-рядко, например за изследване на композитни структури с високо съдържание на влага.

Основните характеристики са показани в таблица 2.2.

Таблица 2.2. Характеристика на индустриални измервателни технологии.

Характеристика	Индустриални технологии
Основна цел	Обратно инженерство, анализ, контрол на качеството
Примери за методи	Индустриален СТ, оптична микротомография, индустриален ЯМР
Тип на обектите	Технически обекти (детайли, материали и сборки)
Използвани материали	Метали, композити, пластмаси, керамика
Формат на изходните данни	Облак от точки, CAD формати (STL, STEP)
Възможност за интеграция с CAD/CAM	Пълна
Приоритет	Точност на измерването, съответствие със стандартите

2.5.1. Анализ на ефективността на традиционни и съвременни методи

Основният акцент е поставен върху ефективността, точността, ресурсната оптимизация и приложимостта в полеви условия.

ЦПУ (CNC – Computer Numerical Control) машините използват предварително зададен G-код за отстраняване на материал от заготовка и постигане на желаната форма. Този метод е широко използван в армейското ремонтно производство поради:

– висока точност; – автоматизация на процесите; – възможност за обработка на различни материали.

Недостатъци: – генериране на отпадък под формата на стружки; – ограничения при създаване на сложни вътрешни геометрии; – изисква време за изработка на приспособления и програмиране.

При адитивните технологии е характерно изграждането на обекти с добавяне на материал, което е противоположен процес на принципа на работа на машините с цифрово-програмно управление (ЦПУ).

Предимствата включват: – способност за производство на сложни и органични геометрии; – намален разход на материал; – бърза изработка на прототипи и резервни части; – възможност за работа в мобилни условия (например полеви 3D лаборатории).

Недостатъци: – ограничена якост на някои материали; – ограничения по отношение на размер и детайлност в зависимост от принтера; – необходимост от последваща обработка и изпичане при някои технологии.

Приложението на тези технологии, в комбинация с методите на обратното инженерство, представлява стратегическо предимство в поддръжката на въоръжението и техниката.

2.5.2. Диагностичен софтуер за ремонтни дейности

С напредването на технологиите диагностичните системи преминават от механични и аналогови методи към компютърно базирани решения, които значително повишават точността и ефективността на откриване на неизправности.

Следващата таблица 2.4 представя примери за диагностични инструменти и системи, използвани в ремонтната практика, включително тяхното приложение, обхват и интерфейс за свързване.

Таблица 2.4. Примери за диагностични средства и области на приложение

№	Наименование на системата/софтуера	Обхват на приложение	Примерна техника	Интерфейс / Протокол
1	Bosch KTS	Двигатели, ECU, ABS, CAN системи	Камиони, леки транспортни машини	OBD-II, K-line, CAN
2	TEXA NAVIGATOR TXT	Диагностика на електроника и системи на превозни средства	Многоцелеви бронетранспортьори, колесни машини	CAN, Bluetooth, USB
3	Jaltest Military (by Cojali)	Интегрирана мултисистемна диагностика	Камиони, БТР-и, артилерийска техника	MIL-STD, CAN J1939
4	PDM Analysis Tools	Мониторинг на вибрации, електро захранване, налягане	Пневмо-хидравлични и електромеханични системи	Аналогов / цифров сензорен
5	Insyte Data Logger	Събиране и анализ на параметри от сензори в реално време	Специализирано оборудване, двигатели и агрегати	USB, Wi-Fi, Ethernet

2.5.3. 3D принтиране и адитивни технологии в ремонтната дейност

Основните видове 3D принтери, използвани в ремонтната практика, включват:

– FDM принтери (Fused Deposition Modeling) – използват се за бързо прототипиране и производство на корпусни детайли от пластмаса.

– SLA/DLP принтери (Stereolithography/Digital Light Processing) – подходящи за създаване на високо прецизни компоненти с малки размери и висока детайлност.

Метални 3D принтери (SLM/DMLS – Selective Laser Melting/Direct Metal Laser Sintering) – използвани за производство на устойчиви метални части като зъбни колела, втулки, корпуси и други критични елементи.

Интегрирането на адитивни технологии в ремонтните формирания е стратегическа стъпка за осигуряване на оперативна автономност, повишаване на капацитета за възстановяване на техниката и оптимизация на логистичните вериги.

2.6. Човешки ресурс: Оценка на наличните специалисти и нуждите от допълнително обучение

Основните проблеми са свързани с:

- недостатъчна квалификация в областта на съвременните производствени технологии;
- липса на систематично обучение по програмиране и управление на ЦПУ машини;
- ограничени познания за използването на CAD/CAM системи и адитивни технологии;
- слаба подготовка в областта на дигиталната диагностика на модерни бойни системи.

Настоящата оценка показва, че използването на традиционните подходи за поддръжка и ремонт е нерационално при условията на съвременните технологични предизвикателства. Затова е необходимо да се приемат мерки, относно постепенно внедряване на съвременни технологии и обучение на специалисти за тяхното ефективно използване.

2.7. Ограничения и предизвикателства при модернизацията на ремонтната дейност

– Бюджетни ограничения произтичат от договорения 2% от брутния вътрешен продукт за отбрана в държавите-членки на НАТО, като от макро-икономическа гледна точка се различават значително.

– Сложност на елементите подлежащи на ремонт – нарастващото използване на композитни материали в новите образци техника, вградени сензори и конструктивни изменения затруднява ремонтното производство.

– Уязвимост на веригата за доставки – оптимизацията на възможностите за снабдяване доведе до минимални срокове за изпълнение и възможно най-ниски цени. В резултат на геополитически промени, трябва да се търси повече гъвкавост, освен в снабдителната верига, но инвестиции в технически средства за ремонт.

Отчитането на горе посочените фактори и тези свързани с повишаване на квалификацията на специалистите може в бъдеще да осигури възможността за повишаване на капацитета за извършване и овладяване на извънплановата ремонтна дейност.

Изводи към втора глава:

1. Снабдяването с резервни части и ремонтът в БА са затруднени от бавни процедури, водещи до престой на въоръжението и намалена бойна готовност.

2. Анализът показва остаряла техника, недостиг на резервни части и недостатъчна квалификация на персонала, но и потенциал за подобрене чрез интегриране на САD/САМ технологии, ЦПУ машини и 3D принтиране.

3. Модернизацията на процесите, съчетана с обучение на специалистите, ще повиши ефективността на ремонтната дейност и ще удължи ресурса на наличната техника.

4. Внедряването на иновации следва да бъде поетапно, съобразено с инфраструктурата и необходимостта от повишаване на бойната готовност.

ГЛАВА ТРЕТА

ИЗСЛЕДВАНИЯ И АНАЛИЗИ НА ЕЛЕМЕНТ ОТ ВЪОРЪЖЕНИЕТО И ТЕХНИКАТА ПОСРЕДСТВОМ ИНОВАТИВНИТЕ ТЕХНОЛОГИИ

3.1. Избор и характеристика на елемент от въоръжението и техниката за анализ и ремонт

При извършените проучвания за възникващите характерни неизправности в бронетанковата техника са определени агрегатите, частите и механизмите, които са с проблемно снабдяване. Агрегатът с най-често срещани неизправности е гориво-подкачващата помпа РНМ–1к показан на фигура 3.1.



Фиг. 3.1. Гориво-подкачваща помпа РНМ-1к.

3.1.1. Описание на гориво-подкачваща помпа РНМ-1к и неговата функция в системата

Самата гориво-подкачваща помпа е изработена от различни материали, които осигуряват оптимална механична якост и устойчивост на експлоатационни натоварвания.

Спецификата при изработката на детайлите на РНМ–1к е свързана с подбора на материали, които да отговарят на експлоатационните условия, функционалните изисквания и механичната издръжливост в рамките на горивната система.

3.1.2. Причини за повреди при агрегат РНМ-1к

При експлоатацията на техниката са идентифицирани няколко основни фактора, които водят до честите повреди на детайла РНМ–1к:

- *Механични натоварвания;*
- *Конструктивни слабости;*
- *Материални ограничения.*

3.1.3. Характеристика на конструкцията и материалните изисквания за РНМ-1к

Гориво-подкачващата помпа е проектирана със сложни геометрични характеристики, които включват отвори, канали и ребра за усилване. Тези структурни елементи са от съществено значение за функционалността на детайла, тъй като осигуряват прецизно монтиране, стабилно закрепване и оптимално разпределение на механичните натоварвания.

3.1.4. Възможности за възстановяване чрез нови технологии

На базата на извършените анализи са оценени възможностите за възстановяване на детайл РНМ–1к чрез използването на съвременни технологии като 3D принтиране и ЦПУ обработка.

3D принтиране: Тази технология е революционен подход в производството, който осигурява изключителна гъвкавост и бързина при създаването на прототипи и изработката на малки серии от компоненти като РНМ–1к.

Едно от основните предимства на 3D принтирането е възможността за изработка на детайли с комплексни вътрешни и външни геометрии, които са трудни или невъзможни за постигане чрез традиционните методи на производство.

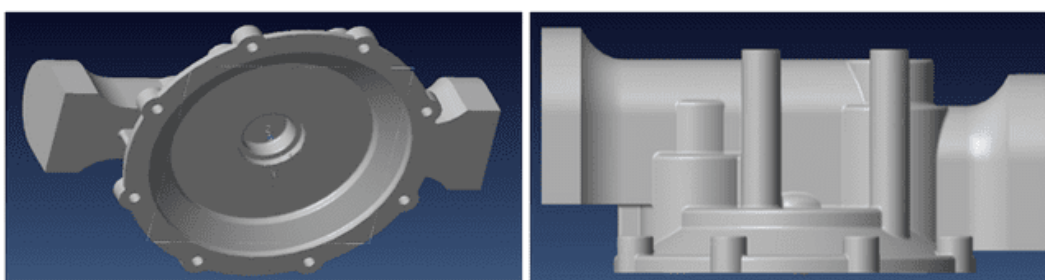
Обработка с ЦПУ машини: Обработката с ЦПУ машини е предпочитан метод в съвременното машиностроене за финално производство на детайлите от РНМ–1к, особено когато се изискват изключителна точност и висока механична здравина. В сравнение с 3D принтирането, ЦПУ обработката използва традиционни инженерни материали като закалена стомана и алуминиеви

сплави, които осигуряват отлична устойчивост на механични натоварвания, вибрации и абразивно износване.

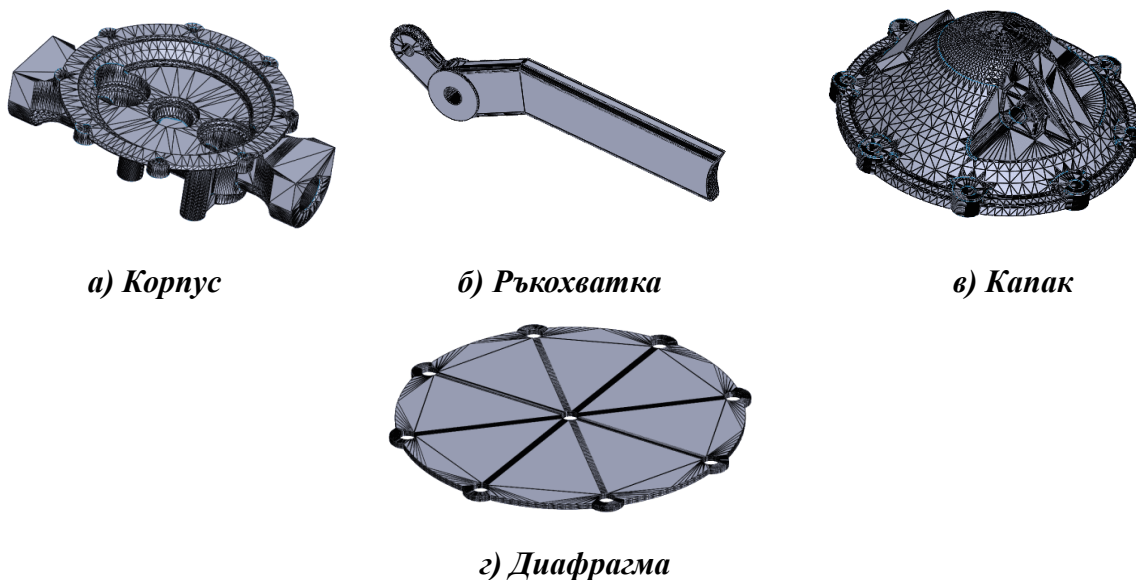
3.2. CAD моделиране и симулиране на детайл в РНМ-1к за възстановяване чрез нови технологии

Необходимостта от създаване на 3D модел на РНМ–1к възниква поради недостъпността на техническата документация, съдържаща информация за основните параметри на агрегата. За целта беше използван реален образец от военно формование, част от състава на Сухопътните войски (СВ).

В настоящото изследване моделът е базиран на файл STL формат, създаден с помощта на софтуера Visi 15.0, след което допълнително модифициран и обработен в SolidWorks (фиг. 3.3 и фиг 3.4).



Фиг. 3.3. Изграждане на модел (Visi 15.0) корпус на РНМ-1к.

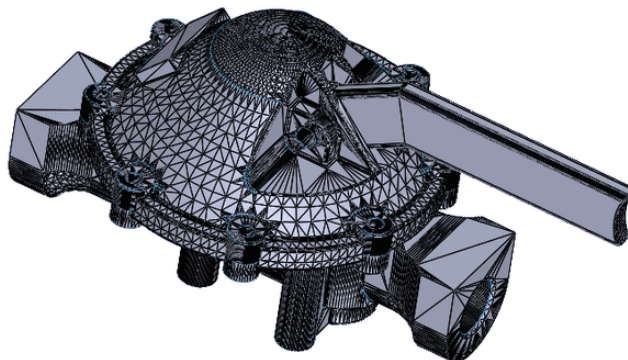


Фиг. 3.4. 3D модели на компоненти на РНМ-1к.

3.2.2. Асемблиране на компонентите в “SolidWorks”

След моделирането на всеки отделен компонент, се обединяват в обща конструкция, като бяха зададени връзки и зависимости, които отразяват реалните монтажни условия. Сглобеният модел е представен на фигура 3.5.

Конструкцията на РНМ–1к се състои от четири основни компонента: корпус, ръкохватка, капак и диафрагма. Критичен аспект в сглобяването на РНМ–1к е осигуряването на надежден контакт между диафрагмата, капака и корпуса. Това се постига чрез прецизно регулиране на силата на затягане, което предотвратява локалната концентрация на напрежения и деформации в диафрагмата. Сглобеният модел е представен на фигура 3.5.

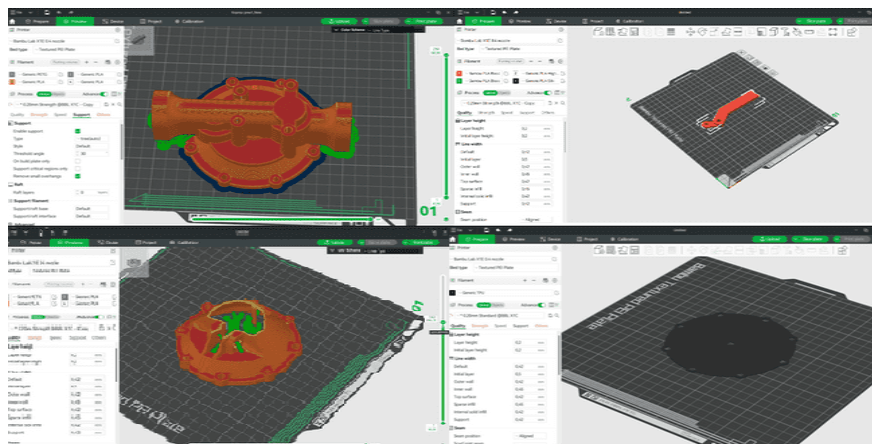


Фиг. 3.5. Сглобена единица – агрегат РНМ-1к.

В заключение, конструкцията на РНМ–1к представлява добре обмислена и функционално оптимизирана сглобка, в която всеки компонент изпълнява ключова роля за цялостната ефективност и експлоатационна надеждност на системата. Разбирането на взаимовръзките между отделните елементи е от съществено значение за правилното приложение и поддръжка на агрегата.

3.3. Създаване на обект посредством 3D технологии (FDM)

За изработването на основните компоненти на детайла РНМ–1к – корпус, ръкохватка, капак и диафрагма – е използван CAD модел, създаден в среда *Visi 15.0*. Моделите са обработени в софтуер *Bambu Studio*, където са конфигурирани параметрите за печат и е извършена подготовка за производство чрез FDM технология (Фиг. 3.6).



Фиг. 3.6. Подготовка и визуализация на моделите за 3D печат в *Bambu Studio*

FDM технологията позволява бързо изработване на пластмасови компоненти с добра геометрична точност и е подходяща за ниско- и средно натоварени елементи. За настоящото изследване са използвани филаменти PETG за корпусни части и TPU 70 за гъвкавата диафрагма.

3.4. Създаване на детайли посредством ЦПУ център

За механична обработка на металните компоненти е използван ЦПУ център *Mazak Smooth Technology* (Фиг. 3.8). Машината разполага с автоматизирани функции за генериране на параметри и активен контрол на инструментите, което повишава точността и намалява времето за обработка.



Фиг. 3.8. ЦПУ – център MAZAK (Smooth technology).

С помощта на ЦПУ технологията са изработени корпус, ръкохватка и капак от алуминиева сплав Alloy 4010 (AlSi7Mg). Чрез 3D принтиране са създадени същите детайли в PETG, както и диафрагма от TPU 70 (Фиг. 3.9).



Фиг. 3.9. ЦПУ – център MAZAK(Smooth technology) – задаване на параметри програматор.

Функцията за активен контрол на режещия инструмент подобрява точността и позиционирането по всички оси, като намалява времето за обработка и предотвратява прекомерното износване на режещия ръб.

Изработени детайли чрез ЦПУ и 3D принтиране:



а) Корпус



б) Ръкохватка



в) Капак

Фиг. 3.11. Изработени елементи от РНМ-1 – ЦПУ технология.

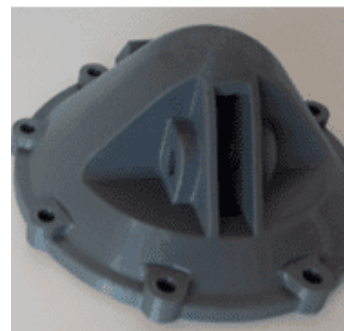
Съвместното използване на двата метода осигурява баланс между ефективност, точност и икономичност, като оптимизира както времето за производство, така и механичните характеристики. Следователно, изборът на технология трябва да се направи въз основа на необходимото приложение, габарити на оборудването и време за изработка на детайлите.



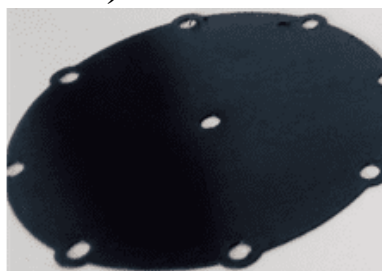
а) Корпус



б) Ръкохватка



в) Капак



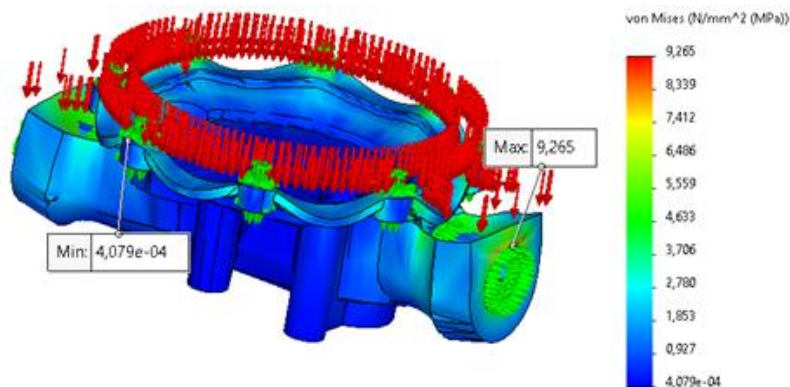
*г) Мембрана
(Диафрагма)*

Фиг. 3.12. Изработени елементи от РНМ-1 – адитивна технология.

3.6. Резултати от статичния анализ на детайла на РНМ-1к

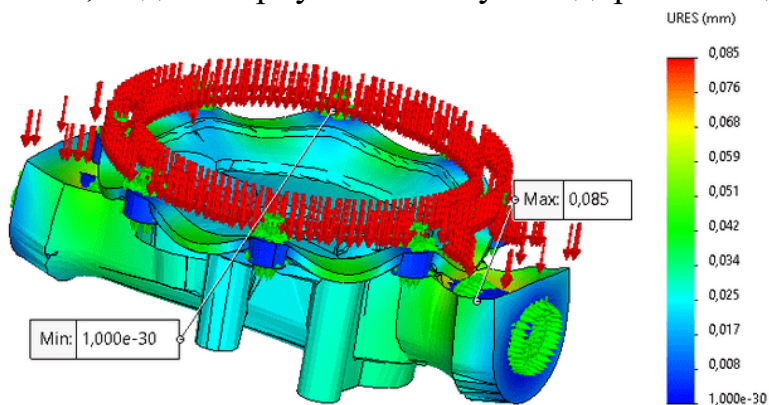
3.6.1. Резултати от статичния анализ на корпуса

Резултатите от статичния анализ на корпуса, изработен от PETG, при приложен разпределен товар от 3 МРа, показват разпределението на напреженията по критерия на von Mises (фиг. 3.13). Максималното напрежение, отчетено в модела, е 9,265 МРа, като то се наблюдава в най-натоварените зони, основно около местата за закрепване.



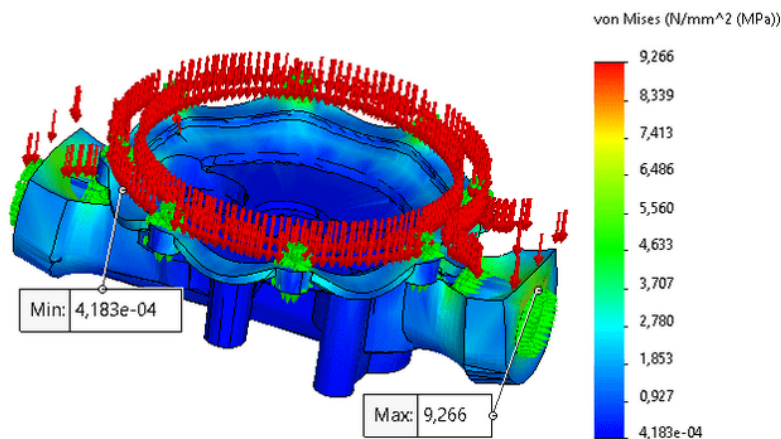
Фиг. 3.13. Разпределение на напреженията по von Mises за корпуса при натоварване от 3 МРа – материал PETG.

Анализът на резултатите за деформациите на корпуса, изработен от PETG, показан на фигура 3.14, показва разпределението на максималните измествания при приложеното натоварване от 3 МРа. Максималното отчетено изместване е 0,085 mm, като тази стойност се наблюдава в зоните, които са най-отдалечени от точките на закрепване, където корпусът не получава директна подкрепа.



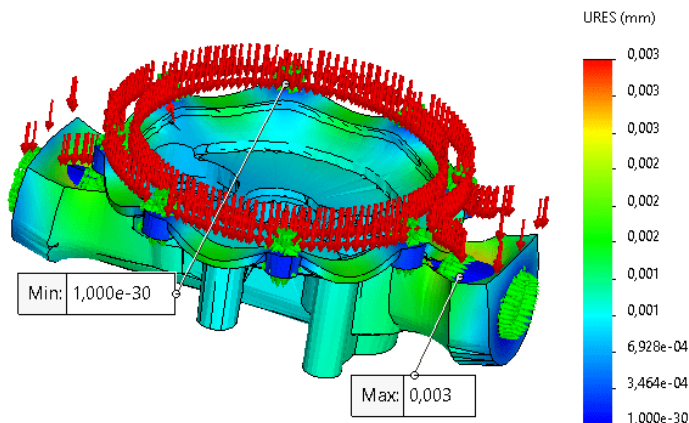
Фиг. 3.14. Максимални измествания на корпуса при натоварване от 3 МРа – материал PETG.

Резултатите от анализа на корпуса, изработен от сплав Alloy 4010 (AlSi7Mg), показват разпределението на напреженията по критерия на von Mises при натоварване от 3 МРа. На фигура 3.15 максималното напрежение, отчетено в анализа, достига стойност от 9,266 МРа, като тази стойност е локализирана около критичните точки на закрепване и зоните, където корпусът е подложен на най-големи механични натоварвания.



Фиг. 3.15. Разпределение на напреженията по von Mises за корпуса при натоварване от 3 МПа – материал Alloy 4010.

На фигура 3.16 се вижда, че максималното напрежение достига стойност от 9,266 МПа, което е концентрирано в зоните около точките на закрепване. Това са местата, където материалът поема най-големите сили и където натоварването е най-голямо.

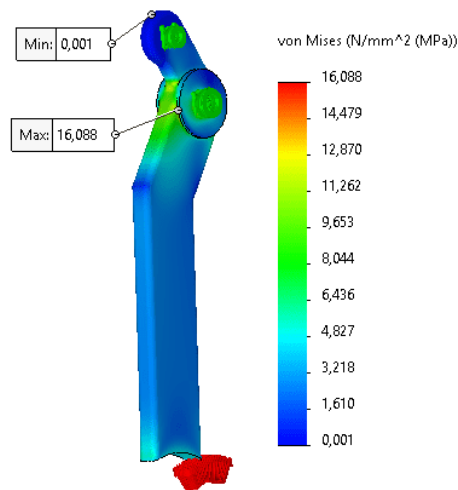


Фиг. 3.16. Максимални измествания на корпуса при натоварване от 3 МПа – материал Alloy 4010.

Тъй като максималното напрежение е значително по-ниско от границата на якост на сплавта (около 300 МПа), можем да заключим, че корпусът няма да претърпи структурни повреди или трайни деформации при това натоварване.

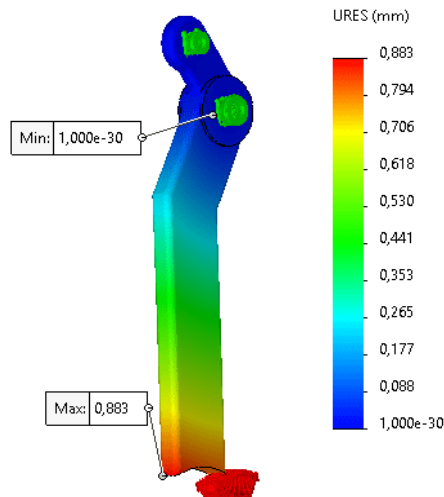
3.6.2. Резултати от статичния анализ на ръкохватка

На фигура 3.17 е визуализирано разпределението на напреженията по критерия на von Mises. По този критерий се отчита общото напрежение, като се комбинират различните компоненти на натоварването.



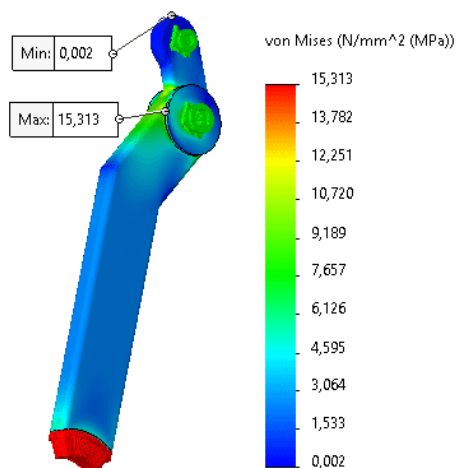
Фиг. 3.17. Разпределение на напреженията по von Mises за ръкохватката при натоварване от 2,5 MPa – материал PETG.

Резултатите от анализа за деформацията на ръкохватката от PETG показват максимално изместване от 0,883 mm, както е представено на фигура 3.18.



Фиг. 3.18. Максимални измествания на ръкохватката при натоварване от 2,5 MPa – материал PETG.

Фигура 3.19 илюстрира разпределението на изместванията по цялата ръкохватка, където цвeтова скала от червено към синьо обозначава различните нива на деформация. Анализът показва максимално напрежение от 15.313 MPa, съсредоточено в зоната на закрепване, където ръкохватката е фиксирана и изпитва най-големи натоварвания.



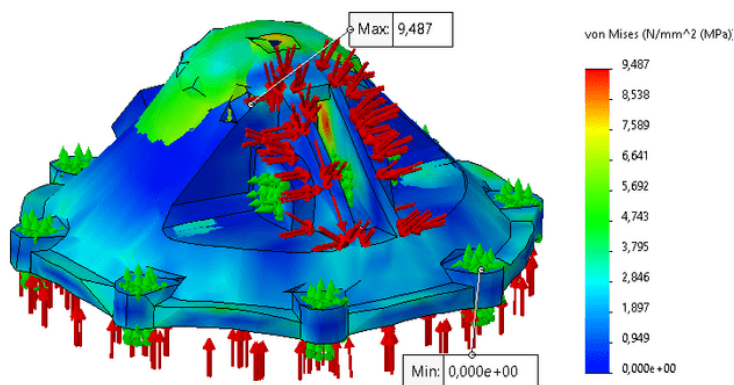
Фиг. 3.19. Разпределение на напреженията по von Mises за ръкохватката при натоварване от 2,5 MPa – материал Alloy 4010 (AlSi7Mg).

На фигура 3.20 е представено максималното изместване на ръкохватката от Alloy 4010 (AlSi7Mg), което е 0,032 mm, измерено в свободния край на ръкохватката. Тази стойност е минимална и показва, че материалът демонстрира висока устойчивост на деформация.

Сравнителният анализ показва, че ръкохватката, изработена от Alloy 4010 (AlSi7Mg), проявява значително по-малко изместване в сравнение с PETG (0,032 mm спрямо 0,883 mm), което се дължи на високата якост и твърдост на алуминиевата сплав.

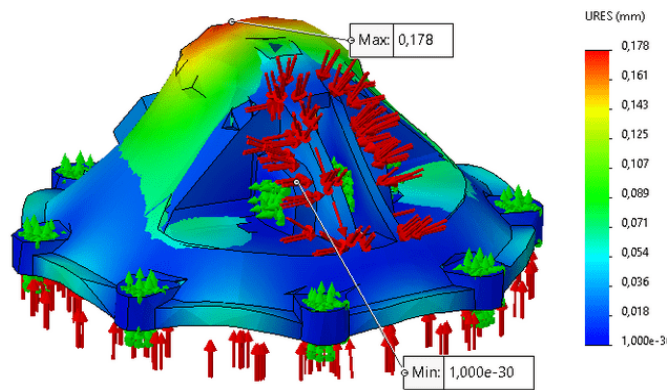
3.6.3. Резултати от статичния анализ на капак

Статичният анализ на капака, изработен от PETG, показан на фигура 3.21, показва разпределението на напреженията при приложено механично натоварване. Максималното напрежение, отчетено в анализа, е 9,487 MPa.



Фиг. 3.21. Разпределение на напреженията по von Mises за капака при натоварване от 3 MPa – материал PETG.

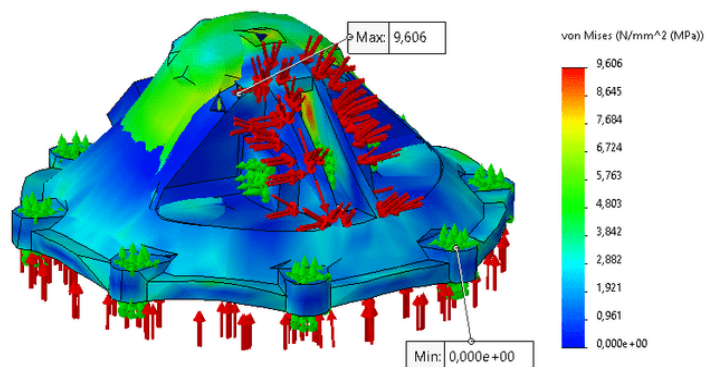
Резултатите от статичния анализ на капака показани на фигура 3.22, изработен от PETG, показват максимално изместване от 0,178 mm, както е илюстрирано на фигурата.



Фиг. 3.22. Максимални измествания на капака при натоварване от 3 МПа – материал PETG.

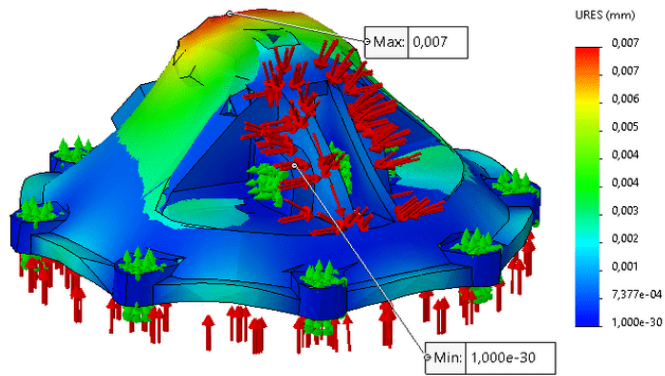
Стойността на максималното изместване от 0,178 mm е в рамките на допустимите граници за PETG, което потвърждава, че капакът няма да претърпи трайни деформации или структурно разрушение под текущото натоварване от 3 МПа.

Резултатите от анализа на капака, изработен от Alloy 4010 (AlSi7Mg), показани на фигура 3.23, разкриват разпределението на напреженията при приложено механично натоварване от 3 МПа. Максималното отчетено напрежение в този модел достига 9,606 МПа, съсредоточено в зоните на най-голямо натоварване, визуализирани с червени и оранжеви цветове.



Фиг. 3.23. Разпределение на напреженията по von Mises за капака при натоварване от 3 МПа – материал Alloy 4010 (AlSi7Mg).

Резултатите от анализа на капака, изработен от Alloy 4010 (AlSi7Mg), показани на фигура 3.24, представят разпределението на деформациите при приложено натоварване от 3 МПа. Максималната деформация, отчетена в модела, е 0,178 mm и се наблюдава в горната част на куполната структура, която е най-отдалечена от точките на закрепване.

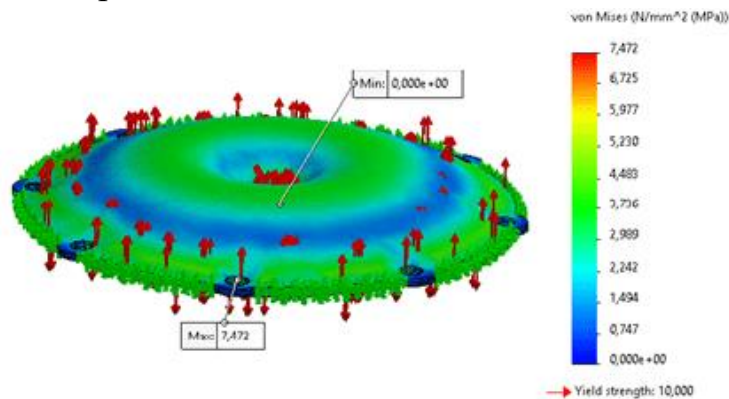


Фиг. 3.24. Максимални измествания на капак при натоварване от 3 МРа – материал Alloy 4010 (AlSi7Mg).

Сравнявайки с PETG, максималното напрежение при Alloy 4010 (AlSi7Mg) е 9,606 МРа и също е съсредоточено в критичните зони около точките на закрепване. Докато напрежението е значително по-ниско от това при PETG, Alloy 4010 (AlSi7Mg) има много по-висока граница на якост (приблизително 300 МРа), което го прави много по-устойчив на натоварване.

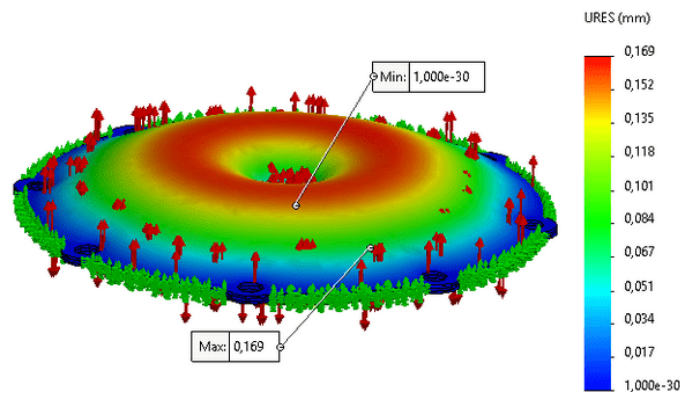
3.6.4. Резултати от статичния анализ на диафрагма

Резултатите от анализа, представени на Фигура 3.25, показват, че максималното напрежение в диафрагмата достига 7,48 МРа, като това напрежение е визуализирано в червени зони около областите с най-голяма концентрация на натоварвания.



Фиг. 3.25. Разпределение на напреженията по von Mises на диафрагмата при натоварване от 3 МРа – материал TPU 70.

На Фигура 3.26 е показано разпределението на изместванията по повърхността на диафрагмата. Максималното изместване на диафрагмата е 0,169 mm, регистрирано в тези области поради липсата на непосредствена опора.



Фиг. 3.26. Максимални измествания на диафрагмата при натоварване от 3 МРа – материал TPU70.

Анализът показва, че диафрагмата успешно издържа приложеното натоварване и остава в рамките на безопасността, като запазва както своята функционалност, така и механичната си цялост. Това я прави надеждна за употреба при зададените експлоатационни условия.

Обобщените резултати от статичния анализ на компонентите на конструкцията – корпуса, ръкохватката, капака и диафрагмата – демонстрират техните механични характеристики и поведение при приложените натоварвания. Всеки от детайлите е изработен от подходящ материал, като PETG, Alloy 4010 (AlSi7Mg), TPU 70 е подходящ за диафрагмата.

3.7.1. Сравнение на материалите PETG и Alloy 4010 (AlSi7Mg) за компонентите на РНМ-1к

При анализа на основните компоненти на РНМ-1к – ръкохватка, корпус и капак – беше проведено сравнение между два материала: PETG и Alloy 4010 (AlSi7Mg). В Таблица 3.1 са показани основните свойства на двата материала, които имат ключово значение при анализа на механичните им характеристики:

Таблица 3.1. Механични свойства на използваните материали.

Свойство	PETG	Alloy4010 (AlSi7Mg)
Якост на опън (МРа)	50-60	~300
Еластичен модул (GPa)	2-2,5	100-120
Плътност (g/cm ³)	1.27	7,85
Удължение при скъсване (%)	6-10	~12
Устойчивост на удар (J/m ²)	Висока	Средна

В зависимост от експлоатационните условия, изборът на материал за компонентите на РНМ-1к трябва да бъде направен с оглед на конкретните механични изисквания и работната среда.

Изводи към трета глава

1. Чрез метода на крайните елементи (FEA) в *SolidWorks* са анализирани корпусът, ръкохватката, капакът и диафрагмата на детайл РНМ–1к. Статичният анализ показва концентрация на напрежения в зони с максимално натоварване.

2. Изборът на материал е определящ за надеждността: PETG е подходящ при по-ниски натоварвания; Alloy 4010 (AlSi7Mg) осигурява висока стабилност и минимални деформации; TPU 70 е оптимален за диафрагмата, благодарение на якостта и устойчивостта си.

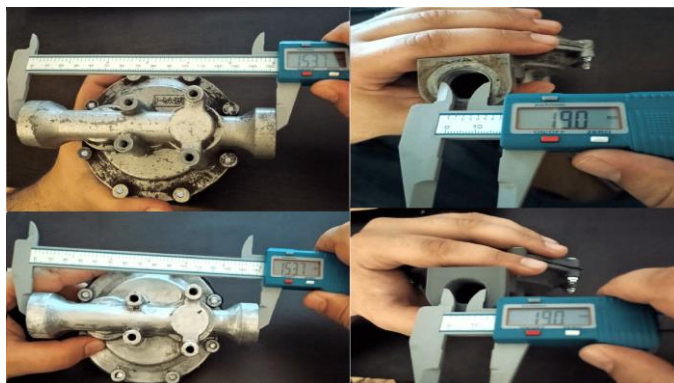
3. Анализът очерта критичните зони и потенциалните слабости на конструкцията. За гарантиране на дълготрайност се препоръчва наблюдение на зоните с високи напрежения и внедряване на конструктивни подобрения.

ГЛАВА ЧЕТВЪРТА ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА КАПАЦИТЕТА ЗА ИЗВЪНПЛАНОВИ РЕМОНТИ

4.1. Експериментално изследване на функционалната съвместимост на детайл, изработен чрез иновативни технологии

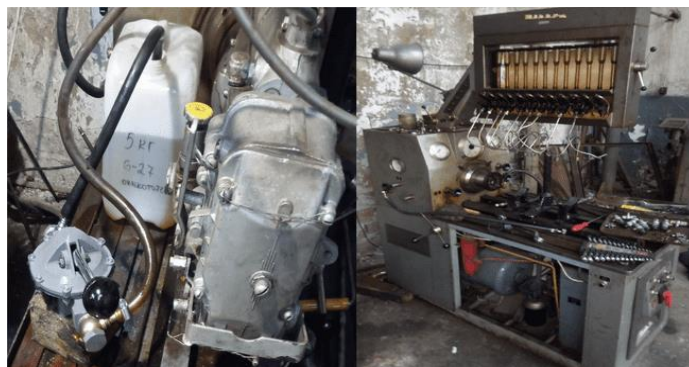
Изследването е фокусирано върху валидиране на геометричната точност, структурната цялост и функционалното поведение на произведените компоненти, сравнявайки ги с оригиналния агрегат. Това включва както стендови изпитания, така и реална интеграция в горивната система на специализирана техника – МАЗ–537Г.

Изпитанията бяха структурирани в следния ред: – визуален оглед на експерименталните образци на помпата РНМ–1к и сравнение със съществуващ оригинален детайл, с цел установяване на съответствия и отклонения в геометрията, конструктивните елементи и повърхностната обработка (фиг. 4.1).



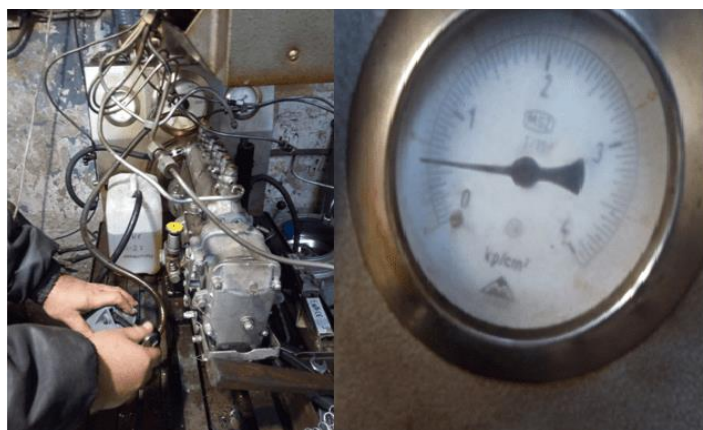
Фиг. 4.1. Визуален оглед и сравнение на възстановени образци с оригиналния компонент РНМ-1К.

– монтаж на двата възстановени образеца, създадени чрез иновативни технологии (3D принтиране и ЦПУ машинна обработка), върху стендово оборудване за предварително тестване в контролирана среда (фиг. 4.2).

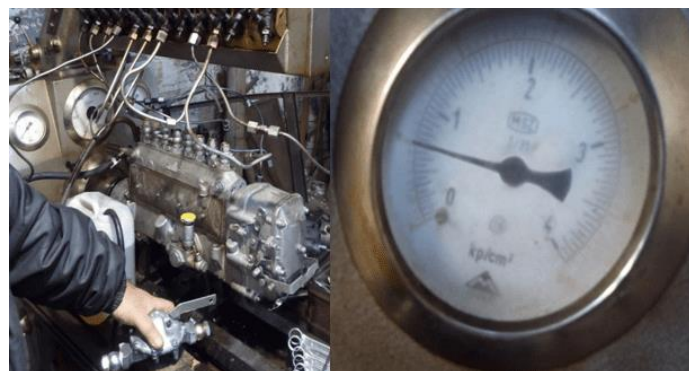


Фиг. 4.2. Монтаж на възстановените образци, създадени чрез 3D принтиране и CNC обработка, върху стендово оборудване за изпитване.

– оценка на създаденото налягане от възстановените образци, сравнено с еталонните стойности, отчетени при оригиналния компонент (фиг. 4.3 и фиг. 4.4);



Фиг.4.3. Изпитване на горивна помпа, създадена чрез 3D принтиране, с отчитане на създаденото налягане.



Фиг.4.4. Изпитване на горивна помпа, създадена чрез ЦПУ обработка и 3D принтиране, с визуализация на създаденото налягане.

– демонтаж на оригиналната гориво–подкачваща помпа от горивната система на МАЗ-537Г, за да се осигури възможност за реално тестване на създадените модели РНМ–1К, посредством иновативни технологии в горивна система на военна техника (фиг.4.5);



Фиг. 4.5. Поставяне на възстановените образци РНМ-1к върху горивната система на МАЗ–537Г.

– функционално изпитване на създадените образци в горивната система на МАЗ–537Г, с акцент върху плавността на работа, синхрон на компонентите и устойчивост на натоварване;

– обратен демонтаж на експерименталните помпи и последващ монтаж на оригиналната РНМ–1к, с цел сравнителен анализ на поведението при аналогични условия;

– проверка на функционалността чрез ръчен привод, което позволи наблюдение на механичната реакция при стартиране, възможностите за създаване на налягане и плавната работа на агрегата.

4.2. Възможности за повишаване на капаците за извършване на извънпланови ремонт чрез внедряване иновативните технологии

Експерименталните изследвания с използване на 3D принтиране (FDM) и ЦПУ обработка показват реална възможност за изработка на компоненти от агрегата РНМ–1К, функционално съпоставими с оригиналните детайли. Това предлага алтернативен подход за техническо осигуряване на войскови формирования в условия на ограничено или затруднено снабдяване. На фиг. 4.6 е представена модулна схема на хибридният производствен процес, илюстрираща последователността от дигитализация и прототипиране до обработка, монтаж и изпитания.

4.2.1. Сравнителен анализ на 3D принтиране и ЦПУ обработка

На фигура 4.7 е представена визуализация на основната технологична последователност при двете технологии, като ясно се открояват разликите

между адитивния и субтрактивния производствен процес, произхождащи от единен CAD модел.



Фиг. 4.7. Визуализация на технологичния алгоритъм при 3D печат и ЦПУ обработка.

За постигане на по-добра обективност в оценката, в таблица 4.1 са съпоставени основни технически и икономически показатели, получени в резултат на реални експериментални изпитания с възстановени компоненти, произведени чрез двата технологични метода – адитивно производство (3D принтиране) и субтрактивна обработка (ЦПУ машини).

Таблица 4.1. Сравнителен анализ на технически и икономически показатели при 3D принтиране и ЦПУ обработка на компоненти РНМ-1К.

№	Параметър	3D печат (FDM)	ЦПУ обработка
1	Технология	Адитивна	Субтрактивна
2	Материал	PETG филамент	Алуминиева сплав
3	Маса на входния материал (kg)	0.277	1.01
4	Маса на отпадък (kg)	0.0375	0.521
5	Време за изработка (min)	819	4035
6	Енергийна консумация (kWh)	1.4	5.1
7	Възможност за повторна употреба	Висока (преизползваем филамент)	Ниска (стружка, трудна за рециклиране)

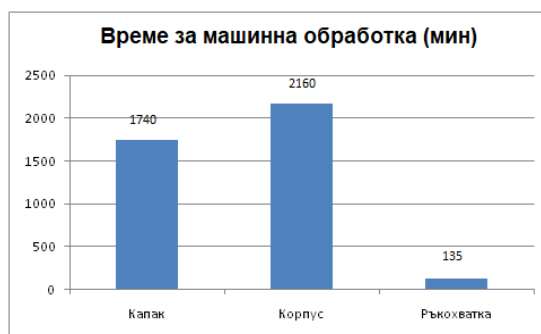
Изводите от сравнителния анализ потвърждават, че 3D принтирането е предпочитано решение при прототипиране, ниски механични натоварвания и ситуации, изискващи бърза реакция. От своя страна, ЦПУ обработката остава водеща при изработка на детайли, при които се търси висока прецизност и структурна якост.

4.2.2. Оценка на времето за производство

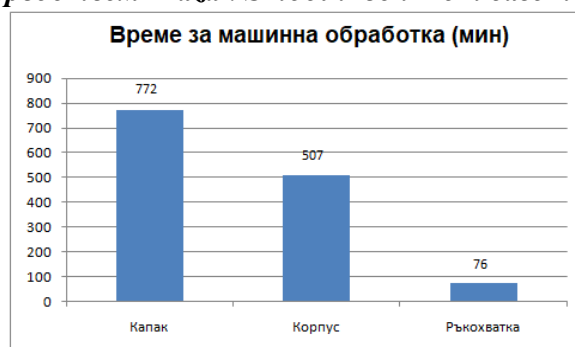
За оценка на производственото време е приложен метод на осредняване, отчитащ различни комбинации от принтери, материали и технологична среда. Анализът показва, че ръкохватката на РНМ–1К се изработва за най-кратко време както при FDM принтиране – средно 70 минути (Фиг. 4.8), така и при ЦПУ обработка – средно 76 минути (Фиг. 4.9 и 4.10).



Фиг. 4.8. Време за 3D печат на отделните компоненти от РНМ-1к, изработени чрез FDM технология.



Фиг. 4.9. Време за ЦПУ обработка на отделните компоненти от РНМ-1к, изработени посредством Mazak SmoothTech – от заготовка.

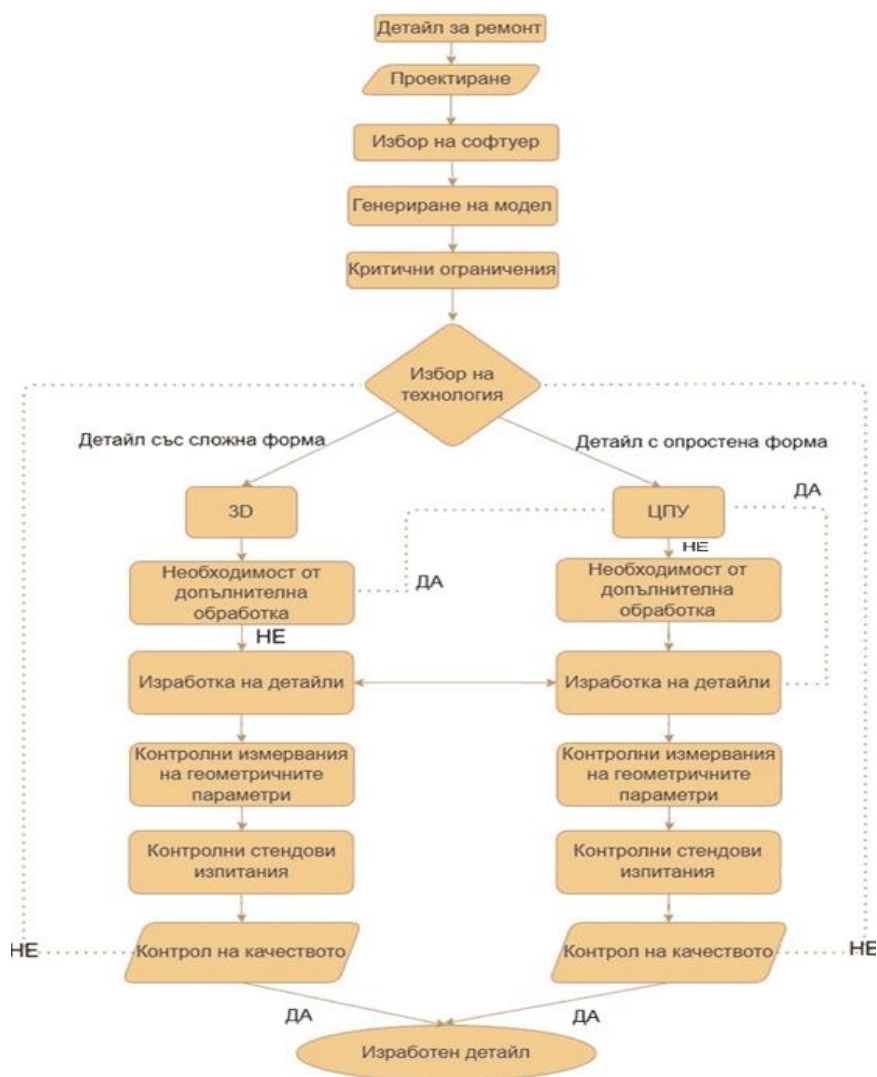


Фиг. 4.10. Време за ЦПУ обработка на отделните компоненти от РНМ-1к, изработени посредством Mazak SmoothTech – от отливки.

Тези резултати потвърждават, че изборът на технология и тип заготовка оказват съществено влияние върху времето за производство, като адитивният метод е по-бърз при малки и сложни геометрии, а субтрактивният – при по-големи серии и метални елементи.

4.3. Алгоритъм за избор на иновативна технология при изработване на детайли

Алгоритмът представен на фиг. 4.11, служи като основа за вземане на решение относно избора между добавъчни технологии (3D принтиране) и механична обработка с ЦПУ машини, в зависимост от геометрията, функциите и критичните зони на съответния елемент.



Фиг. 4.11. Алгоритъм за избор изработка на детайли посредством иновативните технологии 3D(FDM) и ЦПУ машини.

4.4. Приложение в специфични ремонтни ситуации

Изводи към четвърта глава

1. Иновативните технологии – 3D печат (FDM) и механична обработка с ЦПУ – се утвърждават като ефективна алтернатива на традиционните логистични мрежи за резервни части.

2. В условия на ограничен достъп или висока себестойност на оригиналните компоненти, прилагането на 3D принтиране и ЦПУ обработка във войскови условия осигурява икономически изгодно и оперативно гъвкаво решение.

3. ЦПУ обработката позволява използване на различни метали и полимери, докато при адитивното производство изборът на подходящи филаменти и композити повишава ефективността и намалява разходите по логистичната верига.

4. Алгоритмът за избор и изработка на детайли чрез иновативни технологии предлага структурирано и надеждно управление на ремонтния процес.

Заклучение към четвърта глава:

Комбинираното използване на 3D печат и ЦПУ обработка трансформира традиционните ремонтно-възстановителни дейности в условията на военна и кризисна логистика. Експериментите и анализите доказват съкращаване на производственото време, намаляване на разходите и повишаване на автономността на ремонтните формирания. Интеграцията на тези технологии осигурява критични предимства при извънпланови ремонти и очертава перспективи за бъдещото им внедряване като част от стратегическата концепция за поддръжка и устойчивост на въоръжените сили.

Общи изводи:

1. В дисертационния труд е извършен задълбочен анализ на системите за техническа поддръжка и ремонт във въоръжените сили на България и страните членки на НАТО, като са идентифицирани основните предизвикателства и ограничения.

2. Обоснована е необходимостта от интеграция на съвременни производствени технологии – 3D печат и ЦПУ обработка – за повишаване на капацитета за извънпланови ремонти и съкращаване на времето за възстановяване на техниката.

3. Разработен е цялостен технологичен процес за възстановяване на компоненти от горивни системи чрез CAD моделиране, симулации, 3D печат и ЦПУ обработка.

4. Експериментално е доказано, че 3D принтирани детайли от PETG и ЦПУ обработени елементи от сплав Alloy 4010 (AlSi7Mg) могат успешно да заместят оригинални части при определени условия на експлоатация.

5. Предложени са конкретни възможности за внедряване на иновативните технологии в ремонтните формирания на тактическо и оперативно ниво, включително създаване на CAD/CAM база данни, използване на FDM принтери в полеви условия и внедряване на CNC центрове и SLA/SLS системи в стационарни структури. Комбинацията от 3D печат и ЦПУ обработка, съчетана с квалификация на персонала и автоматизация, води до значително повишаване на ремонтния капацитет и устойчивостта на въоръжените сили.

3. НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

3.1. Научно-приложни приноси

1. Разработена е технологична последователност за аварийни ремонти чрез локално производство, приложима във формиранията на Българската армия.

2. Експериментално е доказана приложимостта на високоякостни полимери и метални сплави за резервни части, подложени на натоварвания, характерни за бронетанковата техника.

3. Създадена е методика за интеграция на адитивно и субтрактивно производство в системите за ремонт и поддръжка, базирана на оценка на ресурсите и оперативните изисквания.

4. Формулирани са критерии за оценка на икономическата ефективност при внедряване на съвременни производствени технологии във войсковите ремонти.

3.2. Приложни приноси

1. Определени са якостните характеристики на изработените елементи чрез CAD/CAM софтуер, съобразени с конструктивните и експлоатационните изисквания.

2. Създаден е виртуален 3D модел на гориво-подкачваща помпа РНМ-1К, валидиран посредством якостни симулации и приложен при експериментално възстановяване на повредени компоненти.

3. Реализиран е цялостен практически процес за производство и анализ на компоненти чрез FDM принтиране и ЦПУ обработка, доказващ технологичната приложимост на методите в полеви условия.

4. Формулирани са условия и параметри, при които съвременните технологии могат надеждно да заместят традиционните методи за ремонт на въоръжение и техника.

4. НАУЧНИ ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Чиликов В.Г. „Модернизация и усъвършенстване на способностите на ремонтните формирования от състава на Сухопътни войски” Международна научна конференция „ХЕМУС–22 – отбрана, антитероризъм и сигурност” гр. Пловдив – сборник доклади 2022 : гр. София: ISBN:1312-2916.

2. Чиликов В.Г. „Организация на ремонтно-възстановителната дейност в страните членки от Алианса” Международна научна конференция „ХЕМУС–22 – отбрана, антитероризъм и сигурност” гр. Пловдив – сборник доклади 2022: гр. София: ISBN:1312-2916.

Благодарности:

Авторът изказва дълбокото си уважение и благодарност към своя научен ръководител доцент д-р инж. Иван Николаев Миневски. Благодаря на колегите, които помагаша и подкрепяха работата ми до нейния край чрез съвети.

Авторефератът не съдържа класифицирана информация.

ABSTRACT

The dissertation explores the potential for enhancing the capacity of unscheduled field repairs through the integration of modern manufacturing technologies. The focus is placed on the application of 3D printing and CNC machining for the production and restoration of critical military equipment components. A comprehensive technological process has been developed – from CAD modeling and simulations, through prototyping and mechanical machining, to the experimental validation of the manufactured parts. The experimental results demonstrate that 3D-printed components made of PETG and CNC-machined elements from aluminum alloy can successfully replace original parts under specific operational conditions.

Practical guidelines are proposed for implementing these technologies at both tactical and operational levels, including the creation of a CAD/CAM database, the use of FDM printers in field conditions, and the integration of CNC centers and SLA/SLS systems in stationary facilities. The combination of 3D printing and CNC machining, supported by personnel training and automation, has been proven to increase the efficiency of repair activities and the resilience of the armed forces.

Дисертационният труд разглежда възможностите за повишаване на капацитета за извънпланови ремонти във войскови условия чрез внедряване на съвременни производствени технологии. Основен акцент е поставен върху приложението на 3D принтиране и ЦПУ обработка за изработка и възстановяване на критични компоненти от военната техника. Разработен е цялостен технологичен процес – от CAD моделиране и симулации, през прототипиране и механична обработка, до експериментално валидиране на изработените детайли. Експерименталните резултати показват, че 3D принтирани детайли от PETG и ЦПУ обработени елементи от алуминиева сплав могат успешно да заместят оригиналните компоненти при определени експлоатационни условия.

Предложени са конкретни насоки за внедряване на тези технологии в ремонтните формирания на тактическо и оперативно ниво, включително създаване на CAD/CAM база данни, използване на FDM принтери в полеви условия и интегриране на CNC центрове и SLA/SLS системи в стационарни структури. Комбинацията от 3D принтиране и ЦПУ обработка, съчетана с квалификация на персонала и автоматизация, доказано повишава ефективността на ремонтните дейности и устойчивостта на въоръжените сили.



НАЦИОНАЛЕН ВОЕНЕН УНИВЕРСИТЕТ "ВАСИЛ ЛЕВСКИ"

ФАКУЛТЕТ „ЛОГИСТИКА И ТЕХНОЛОГИИ“

майор инж. ас. Веселин Георгиев Чиликов

**ПОВИШАВАНЕ
НА КАПАЦИТЕТА ЗА ИЗВЪРШВАНЕ НА
ИЗВЪНПЛАНОВИ РЕМОНТИ НА
ВЪОРЪЖЕНИЕТО И ТЕХНИКАТА В
БЪЛГАРСКАТА АРМИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

за придобиване на образователна и научна степен „доктор“

Област на висшето образование: 5. „Технически науки“

Професионално направление: 5.13. „Общо инженерство“

Научна специалност: „Колесни, верижни машини и логистика“

Научен ръководител: доцент д-р инж. Иван Николаев Миневски

Велико Търново

2025 г.

1. CHARACTERISTICS OF THE DISSERTATION

1.1. Relevance of the topic

Increasing the capacity for carrying out unplanned repairs is a key condition for fulfilling the allied obligations of the Republic of Bulgaria within NATO and for building a unified logistics support system. Improving the existing repair system should create new synergies in the field of security and strengthen the operational capabilities of the armed forces.

The insufficient interoperability of the technical maintenance and repair system in the Bulgarian Army puts on the agenda the need to adapt it to modern conditions and standards. Specific repair activities directly depend on the level of scientific and technical development, the implementation of innovative technologies and the availability of trained personnel.

The shortage of specialists in the repair of weapons and equipment reduces maintenance capabilities and leads to the inability to effectively solve emerging problems. The high level of innovative development is unthinkable without qualified personnel. The low level of training is due to the weakened system of vocational education and the lack of sustainable interaction between educational institutions and repair structures.

The relevance of the topic is directly related to the need to maintain the combat capability and operational readiness of the equipment. Modern technologies such as 3D printing and CNC machining provide new opportunities for fast and effective restoration of critical components, which shortens repair time and reduces costs. The implementation of these technologies in the repair bases of the Bulgarian Army will increase the reliability and durability of the equipment, while at the same time reducing dependence on external suppliers and the delivery times for spare parts.

Object: The military repair system in the armed forces.

Subject of the research: The implementation of modern technologies for repair and restoration of parts using 3D printing and CNC machining.

Purpose of the research: develop an effective methodology for integrating modern technologies into unscheduled repairs of M&T.

Main tasks:

1. Analysis of existing methods and procedures for unscheduled repairs.
2. Research the possibilities and advantages of 3D printing and CNC machining for repair and restoration of critical parts.
3. Creation of CAD models and conducting simulations for optimization of components.

4. Conducting practical experiments with the manufactured prototypes and analysis of the results.

5. Assessment of the economic efficiency and applicability of the proposed methods in the real repair activities of the Bulgarian Army.

Limitations: The focus is on the military repair of armored vehicles from Bulgarian Land Forces.

Methods:

1. Descriptive analysis of repair formations.

2. Experimental studies.

3. Creation and validation of CAD/CAM and physical models.

Thesis volume: The dissertation work contains 158 pages, of which the main text covers 142 pages, the literature used – 5 pages, and the appendices – 11 pages. The text includes 6 tables and 30 figures. A total of 86 literary and normative sources were used. Two scientific articles have been published on the topic of the dissertation.

2. CONTENT OF THE DISSERTATION:

CHAPTER ONE

ANALYSIS OF THE EXISTING REPAIR SYSTEMS IN THE BAF AND NATO

1.1. The system for repairing weapons and equipment in the Bulgarian Army and NATO armies.

1.2. Integration of modern technologies in NATO member states

As a result of the literature review, the following conclusions were formulated:

1. The repair bases of the Bulgarian Army lack standardized procedures for the implementation of modern production technologies (3D printing and CNC machining). It is necessary to develop and introduce unified standards and regulations for their implementation.

2. A deficit of research has been established on the durability and reliability of 3D printed and CNC machined components in real operating conditions.

3. There is insufficient data on economic efficiency and return on investment in implementing innovative technologies in repair activities.

4. There is a lack of practical guidelines for training and qualification of personnel working with 3D printing and CNC machining technologies.

5. Targeted training and preparation of specialists, in line with new technological requirements, is the main factor for the successful implementation of modern production methods in the repair systems of the armed forces.

CHAPTER TWO

STATE AND ANALYSIS OF THE CURRENT CAPACITY OF THE REPAIR FORMATIONS OF THE LAND FORCE OF THE BULGARIAN ARMY

2.1. Analysis of the system for supplying spare parts for weapons and equipment

The supply of spare parts is a key element for ensuring repair and restoration activities in military formations. The material resources for the Bulgarian Army are received and stored in the bases of the Logistic Support Command, from where they are distributed to the formations of the types of armed forces. The activities of receiving, reporting and scrapping the armored vehicle and tank assets are regulated by specialized regulatory documents. The supply is carried out in two main ways - from the warehouses of the Ministry of Defense and from the commercial network. The analysis of the existing logistics system shows number of problems that directly affect the maintenance of equipment:

- Outdated infrastructure – a large part of the warehouses and repair facilities are designed for equipment from the Cold War era and do not meet modern standards.

- Shortage of spare parts – discontinued supplies of Soviet equipment and the lack of licensed manufacturers lead to serious difficulties.

- Ineffective inventory management – the absence of integrated information systems makes planning and rapid response difficult.

- Dependence on external suppliers – some of the necessary parts are imported from abroad, which extends the deadlines, reduces combat readiness and hides risks related to the political situation.

In view of the accelerated development of high-precision weapon systems and new operational and procedural requirements, the logistics system must be adapted to ensure timely and effective support of formations in various combat conditions. This leads to the need for technological means for parallel support of the implemented standards.

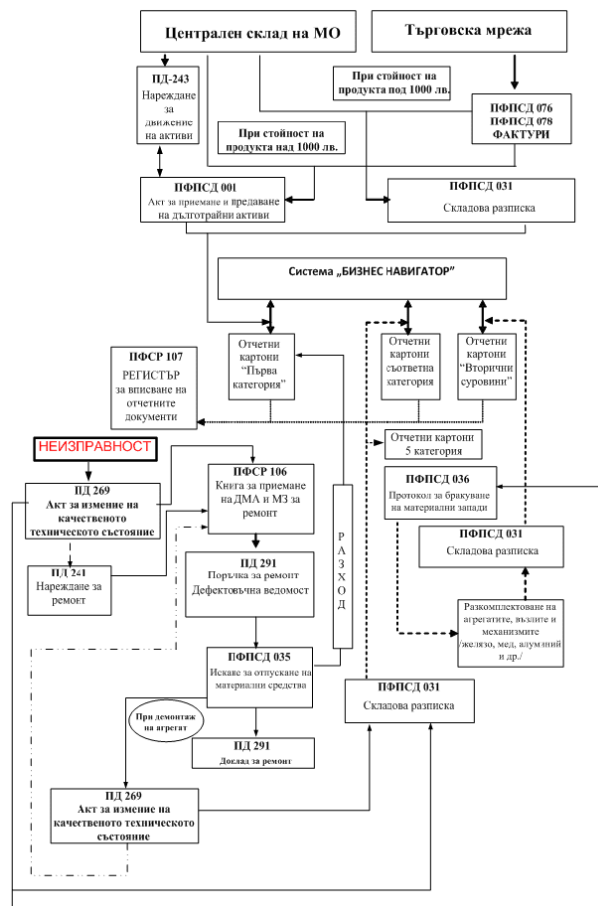


Fig. 2.1. Algorithm for the movement of material resources.

2.2. General characteristics of repair and restoration activities

Repair and restoration activities are a set of activities aimed at restoring the technical suitability of weapons and equipment in order to maintain the necessary operational readiness of the formations. In the modern conditions of a dynamic operational environment, repair and production processes acquire critical importance for ensuring the continuous functionality of combat systems

2.3. Analysis of critical parts and mechanisms – identification of components with a high failure rate

The military equipment of the Bulgarian Army is characterized by high durability and simple design. However, number of factors lead to frequent breakdowns and malfunctions, requiring unscheduled repair activities. Within the framework of this study, an analysis and summary of data on current repairs of the first and second degree for a period of ten years (2013–2023) was carried out. The results are presented in Table 2.1.

Table 2.1. Information on repair activities during the period 2013-2023.

№	Military structure	1st degree repair	2nd degree repair	Repair of aggregates	Notes
1.	Units number for repair				
2013		107	2	1	Armored personnel carriers, Infantry fighting vehicles
2014		118	12	1	Tanks - T – 72 , Armored personnel carriers, Infantry fighting vehicles, Other self-propelled armoured land vehicles equipped with weapon installations
2015		202	11	-	Crawler tractors
2016		198	9	-	Engineering machines
2017		240	4	-	
2018		221	2	3	
2019		118	4	2	
2020		107	3	1	
2021		112	16	-	
2022		320	20	3	
2023		315	26	6	
2	Land force unit				
2013			98	8	
2014			103	9	
2015			123	13	
2016			120	18	
2017				12	
2018				16	
2019				14	
2020				20	
2021				23	
2022			150	31	
2023			162	26	
№	Base units of reapiroment	1st degree repair	2nd degree repair	Repair of aggregates	Notes: Hole repair technics
1.	<i>Logistics Support Regiment</i>	300	512		Period of 1 year
2.	<i>Weapons and Equipment Repair Base</i>	260	540		Period of 1 year

The report was prepared on the basis of Order OX–1029/15.10.2021, Section II, Art. 69, para. 1 and para. 2, related to the reporting of malfunctions in the electronic edition of the "Book for Reporting of Malfunctioning Vehicles" and the information

submitted on a six-monthly basis by the Land Forces Command to the Logistics Directorate of the Ministry of Defense.

2.3.1. Classification of repair activities

In the analysis of repair activities in the period from 2013 to 2023, several main criteria are established: – number of goals in the repair activity and optimality criteria; – relationship between optimality and restrictive conditions related to the time for eliminating emergency repairs; – unforeseen factors affecting the effectiveness of repair activities.

2.3.2. Possibility of reducing repair time and costs

The analysis of repair and restoration activities shows that the methods and means of carrying out repairs are developing dynamically depending on the incoming new equipment and the improvement of the technical means used in the repair processes. Taking into these factors, together with the need to improve the qualifications of repair personnel, will allow for increasing the capacity to carry out and master unscheduled repair activities in the future.

2.4. Capacity of repair formations and available infrastructure – assessment of existing conditions for the implementation of new technologies

The repair units of the Land Forces (LF) of the Bulgarian Armed Forces play a key role in the maintenance and restoration of weapons and equipment, despite the limitations in technical means and the shortage of spare parts. Maintaining the available weapons and equipment in working condition under these conditions is the result of highly organized efforts and adaptability of the repair structures.

2.4.1. Logistics Support Regiment

As of June 1, 2008, the Logistics Support Regiment has been reorganized and is the legal successor to the one established on October 1, 2000. Figure 2.2 presents the organizational chart of the Logistics Support Regiment.

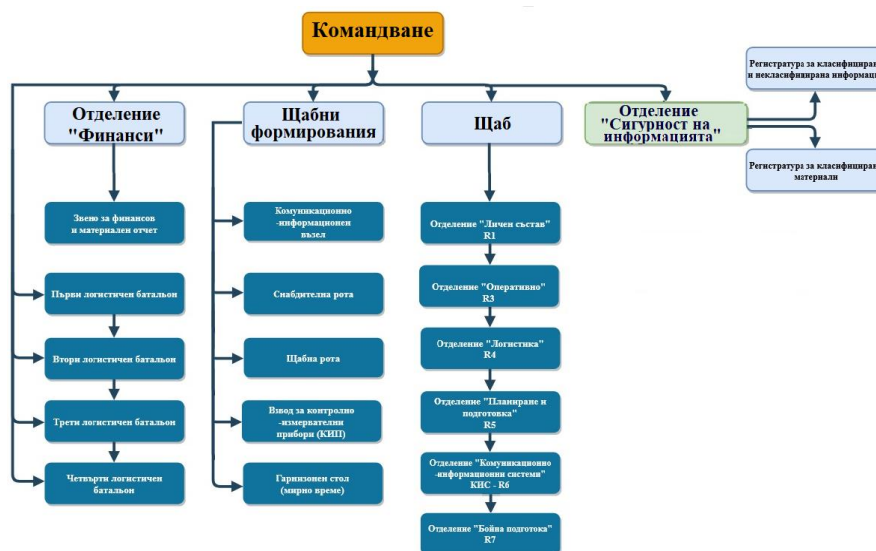


Fig. 2.2. Exemplary structure of the Logistics Support Regiment.

The Logistics Support Regiment is designed to provide comprehensive logistics support to the units of the Land Forces. The regiment's repair platoons perform second-level repairs, working with ready-made units. A specialized unit repair and restoration platoon operates to maintain the necessary stock of units.

2.4.2. Military unit 46700 Weapons and Equipment Repair Base – tasks and structure

Since 2006, military formation 46700 - the city of Sliven has been directly subordinated to the Land Forces Command (LFC) of the Bulgarian Armed Forces. In peacetime, the base has the organizational status of a battalion, and in wartime it is deployed on wartime staff as a regiment for the repair of weapons and equipment.

The organization in peacetime is built on a company basis, with each company operating in stationary conditions, designed as a workshop.

The main structural elements are shown in Figure 2.3. The technological capabilities of the workshop for the repair of armored vehicles can be classified as follows: – current repair of II and III levels of tanks (capacity: 1–2 tanks per month); – current repair of II and III levels of BTR, BRDM and MTLB; – current repair of tank units (gearbox, reducer, side transmission); – ongoing repair of MTLB and BTR units (main transmissions, reducers, transfer cases).

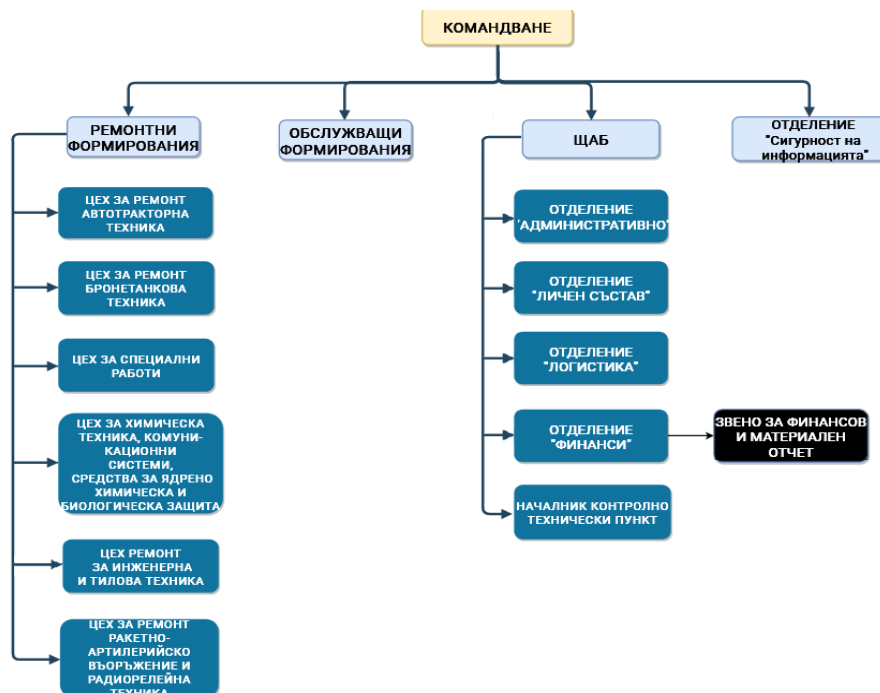


Fig. 2.3. Exemplary structuring scheme of military unit.

2.4.3. Equipment and technical capabilities: Analysis of available diagnostic and repair equipment, including the ability to work with CNC machines and 3D printers

The review of the possibilities for implementing modern production technologies, such as CNC machines and 3D printers, shows that the modernization of the repair infrastructure is a main condition for increasing the capacity for carrying out unscheduled repairs. The available equipment in the repair units is currently aimed mainly at providing current and medium-sized repairs of the available equipment, and there is a need for additional equipment for automated processing and rapid prototyping of spare parts. The use of these technologies will allow for reducing repair time, optimizing resources and increasing the efficiency of repair and restoration activities.

2.4.4. Assessing the suitability of production automation

2.5. Comparative analysis of current methods and potential CAD and CAM solutions

a) Reverse engineering

Reverse engineering is the process of reconstructing the design documentation or 3D model of an existing part by physically measuring and analyzing it. This method provides a solution related to the physical model, which is the main source of

information for the CAD model based on measurements. This is also called the physical-to-digital process, depicted in Figure 2.4.

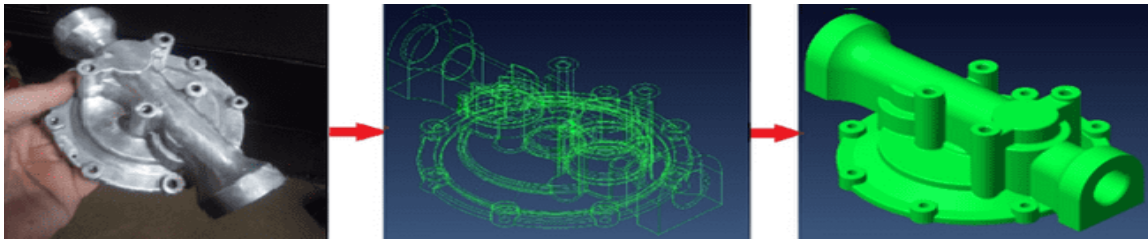


Fig. 2.4. From physical detail to digital 3D object.

b) Basic phases of reverse engineering (RE)

The reverse engineering process involves three main phases that take a physical part to a digital 3D model ready for analysis, modification, or reproduction. These main steps are schematically presented in Figure 2.5, which illustrates the three key stages of reverse engineering and their interrelationship to achieve high accuracy and functionality of the reconstructed components.

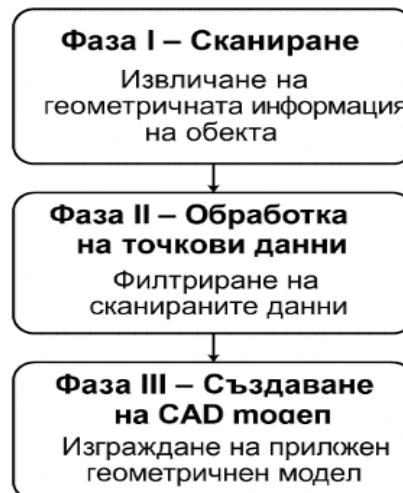


Fig. 2.5. Schematic of the three main phases of reverse engineering.

Industrial technologies are related to the digital representation of the structure of technical objects for the purpose of analysis, quality control or reverse engineering. They include:

- industrial computed tomography;
- used for inspection of internal defects in metal and composite parts;
- optical microtomography;
- applicable in the study of microstructures in materials;
- industrial MRI systems – used less frequently, for example for the study of composite structures with a high moisture content. The main characteristics are shown in Table 2.2.

Table 2.2. Characteristics of industrial measurement technologies.

Характеристика	Индустриални технологии
Основна цел	Обратно инженерство, анализ, контрол на качеството
Примери за методи	Индустриален СТ, оптична микротомография, индустриален ЯМР
Тип на обектите	Технически обекти (детайли, материали и сборки)
Използвани материали	Метали, композити, пластмаси, керамика
Формат на изходните данни	Облак от точки, CAD формати (STL, STEP)
Възможност за интеграция с CAD/CAM	Пълна
Приоритет	Точност на измерването, съответствие със стандартите

2.5.1. Analysis of the effectiveness of traditional and modern methods

The main emphasis is on efficiency, accuracy, resource optimization and applicability in field conditions. CNC (Computer Numerical Control) machines use G-code to remove material from a workpiece and achieve the desired shape.

This method is widely used in military repair production due to:

- high accuracy;
- process automation;
- ability to process different materials.

Disadvantages: – generation of waste in the form of chips; – limitations in creating complex internal geometries; – requires time for making fixtures and programming.

Additive technologies are characterized by the construction of objects by adding material, which is the opposite process to the principle of operation of numerically controlled (CNC) machines.

Advantages include: – ability to produce complex and organic geometries; – reduced material consumption; – rapid production of prototypes and spare parts; – ability to work in mobile conditions (e.g. field 3D laboratories).

Disadvantages: – limited strength of some materials; – limitations in terms of size and detail depending on the printer; – need for subsequent processing and baking in some technologies.

The application of these technologies, in combination with reverse engineering methods, represents a strategic advantage in the maintenance of weapons and equipment.

2.5.2. Diagnostic Software for Repair Activities

As technology advances, diagnostic systems are moving from mechanical and analog methods to computer-based solutions that significantly increase the accuracy and efficiency of fault detection.

The following table 2.4 presents examples of diagnostic tools and systems used in repair practice, including their application, scope and connection interface.

Table 2.4. Examples of diagnostic tools and areas of application

№	Наименование на системата/софтуера	Обхват на приложение	Примерна техника	Интерфейс / Протокол
1	Bosch KTS	Двигатели, ECU, ABS, CAN системи	Камиони, леки транспортни машини	OBD-II, K-line, CAN
2	TEXA NAVIGATOR TXT	Диагностика на електроника и системи на превозни средства	Многоцелеви бронетранспортьори, колесни машини	CAN, Bluetooth, USB
3	Jaltest Military (by Cojali)	Интегрирана мултисистемна диагностика	Камиони, БТР-и, артилерийска техника	MIL-STD, CAN J1939
4	PDM Analysis Tools	Мониторинг на вибрации, електро захранване, налягане	Пневмо-хидравлични и електромеханични системи	Аналогов / цифров сензори
5	Insyte Data Logger	Събиране и анализ на параметри от сензори в реално време	Специализирано оборудване, двигатели и агрегати	USB, Wi-Fi, Ethernet

2.5.3. 3D printing and additive technologies in repair activities

The main types of 3D printers used in repair practice include:

- FDM printers (Fused Deposition Modeling) – used for rapid prototyping and production of plastic body parts.

- SLA/DLP printers (Stereolithography/Digital Light Processing) – suitable for creating high-precision components with small dimensions and high detail.

- Metal 3D printers (SLM/DMLS – Selective Laser Melting/Direct Metal Laser Sintering) – used for durable metal parts such as gears, bushings, housings and other critical elements. The integration of additive technologies in repair formations is a strategic step to ensure operational autonomy, increase the capacity for equipment restoration and optimize logistics chains.

2.6. Human resources: Assessment of available specialists and additional training needs

The main problems are related to: – insufficient qualification in the field of modern production technologies; – lack of systematic training in programming and control of CNC machines; – limited knowledge of the use of CAD/CAM systems and additive technologies; – poor training in the field of digital diagnostics of modern combat systems. The present assessment shows that the use of traditional approaches to maintenance and repair is irrational in the conditions of modern technological challenges. Therefore, it is necessary to adopt measures regarding the gradual introduction of modern technologies and training of specialists for their effective use.

2.7. Limitations and challenges in the modernization of repair activities

– Budgetary constraints arise from the agreed 2% of the gross domestic product for defense in NATO member states, and from a macroeconomic perspective they differ significantly.

– Complexity of the elements subject to repair – the increasing use of composite materials in new equipment models, embedded sensors and structural changes complicate repair production.

– Vulnerability of the supply chain – optimization of supply opportunities has led to minimal lead times and the lowest possible prices. As a result of geopolitical changes, more flexibility must be sought, not only in the supply chain, but also investments in technical means for repair. Taking into account the above factors and those related to improving the qualifications of specialist may in the future provide the opportunity to increase the capacity to perform and master unscheduled repair activities.

Conclusions to the second chapter:

1. The supply of spare parts and repairs in the BAF are hampered by slow procedures, leading to downtime of the armament and reduced combat readiness.

2. The analysis shows outdated equipment, a shortage of spare parts and insufficient qualification of the personnel, but also potential for improvement through the integration of CAD/CAM technologies, CNC machines and 3D printing.

3. The modernization of processes, combined with training of specialists, will increase the efficiency of repair activities and extend the resource of the available equipment.

4. The implementation of innovations should be phased, taking into account the infrastructure and the need to increase combat readiness.

CHAPTER THREE

RESEARCH AND ANALYSIS OF WEAPONS AND TECHNOLOGY ELEMENTS THROUGH INNOVATIVE TECHNOLOGIES

3.1. Selection and characterization of an element of armament and equipment for analysis and repair

In the studies carried out on the typical malfunctions occurring in armored vehicles, the units, parts and mechanisms that have problematic supply have been identified. The unit with the most common malfunctions is the manual fuel pump PHM-1к shown in Figure 3.1.



Fig. 3.1. Manual fuel pump PHM-1κ.

3.1.1. Description of the fuel injection pump PHM-1κ and its function in the system

The manual fuel pump itself is made of various materials that provide optimal mechanical strength and resistance to operational loads. The specificity of the manufacture of the details of the PNM-1κ is related to the selection of materials that meet the operating conditions, functional requirements and mechanical durability within the fuel system.

3.1.2. Causes of failures in the PMN-1κ unit

During the operation of the equipment, several main factors have been identified that lead to frequent failures of the PHM–1κ part.

- Mechanical loads;
- Structural weaknesses;
- Material limitations.

3.1.3. Design characteristics and material requirements for PHM-1κ

The manual fuel pump is designed with complex geometric features that include holes, channels and reinforcement ribs. These structural elements are essential to the functionality of the part, as they ensure precise mounting, stable attachment and optimal distribution of mechanical loads.

3.1.4. Opportunities for recovery through new technologies

Based on the performed analyses, the possibilities for restoring the PHM-1κ part through using of modern technologies such as 3D printing and CNC machining have been assessed.

3D printing: This technology is a revolutionary approach in manufacturing that provides exceptional flexibility and speed in the creation of prototypes and the production of small series of components such as PHM-1κ.

One of the main advantages of 3D printing is the ability to manufacture parts with complex internal and external geometries that are difficult or impossible to achieve using traditional manufacturing methods.

CNC Machining: CNC machining is a preferred method in modern mechanical engineering for the final production of PNM-1k parts, especially when extreme accuracy and high mechanical strength are required. Compared to 3D printing, CNC machining uses traditional engineering materials such as hardened steel and aluminum alloys, which provide excellent resistance to mechanical loads, vibrations, and abrasive wear.

3.2. CAD modeling and simulation of a detail in the PNM-1k for restoration using new technologies

The need to create a 3D model of the PNM-1k arose due to the unavailability of technical documentation containing information about the main parameters of the unit. For this purpose, a real sample from a military formation, part of the Land Forces (LF), was used. In this study, the model is based on an STL format file created using the Visi 15.0 software, then further modified and processed in SolidWorks (Fig. 3.3 and Fig. 3.4).

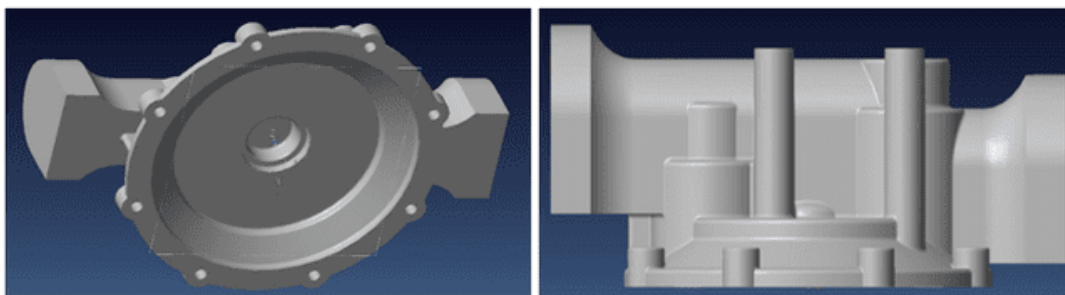


Fig. 3.3. Construction of a model (Visi 15.0) of the hull of PHM-1k.

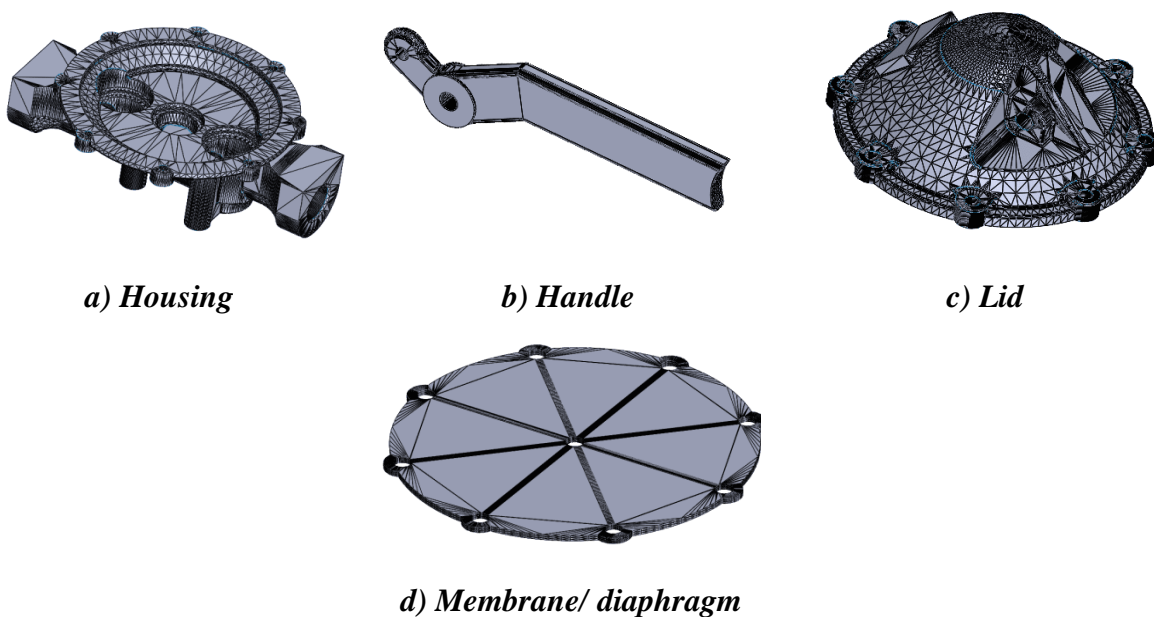


Fig. 3.4. 3D models of components of PHM-1k.

3.2.2. Assembling components in “SolidWorks”

After modeling each individual component, they are combined into a common structure, with connections and dependencies that reflect the real assembly conditions. The assembled model is presented in Figure 3.5.

The design of the PNM–1k consists of four main components: housing, handle, cover and diaphragm. A critical aspect in the assembly of the PNM–1k is ensuring reliable contact between the diaphragm, cover and housing. This is achieved by precisely adjusting the clamping force, which prevents local concentration of stresses and deformations in the diaphragm. The assembled model is presented in Figure 3.5.

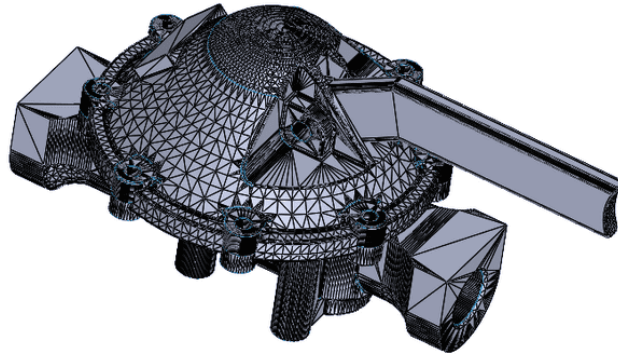


Fig. 3.5. Assembled unit – aggregate PHM-1k.

In conclusion, the design of the PNM–1k represents a well-thought-out and functionally optimized assembly, in which each component plays a key role in the overall efficiency and operational reliability of the system. Understanding the interrelationships between the individual elements is essential for the proper application and maintenance of the unit.

3.3. Creating an object using 3D technologies (FDM)

A CAD model created in Visi 15.0 was used to create the main components of the PNM–1k part – housing, handle, cover and diaphragm. The models were processed in Bambu Studio software, where the printing parameters were configured and preparation for production using FDM technology was carried out (Fig. 3.6).

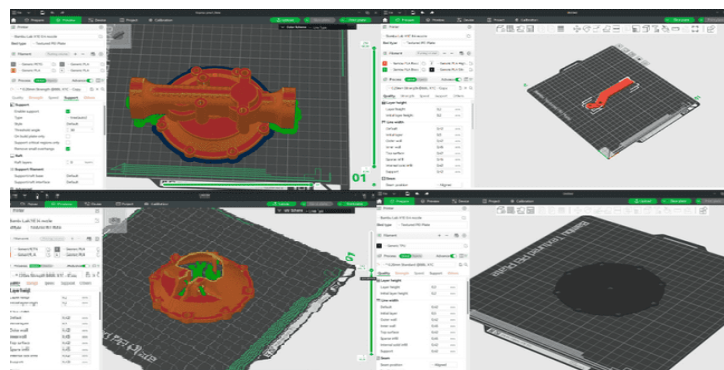


Fig. 3.6. Preparation and visualization of models for 3D printing in Bambu Studio.

FDM technology allows rapid fabrication of plastic components with good geometric accuracy and is suitable for low- and medium-load elements. For this study, PETG filaments were used for body parts and TPU 70 for the flexible Membrane/diaphragm.

3.4. Creating parts using a CNC center

Mazak Smooth Technology CNC center was used for machining the metal components (Fig. 3.8). The machine has automated functions for parameter generation and active tool control, which increases accuracy and reduces machining time.



Fig. 3.8. CNC-centre MAZAK (Smooth technology).

The housing, handle and cover were made of Alloy 4010 (AlSi7Mg) aluminum alloy using CNC technology. The same parts were created in PETG using 3D printing, as well as a diaphragm made of TPU 70 (Fig. 3.9).



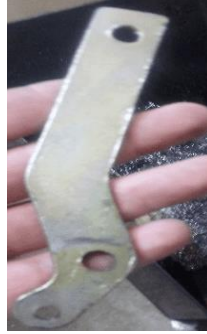
Fig. 3.9. CNC-centre MAZAK(Smooth technology) – setting parameters programmer.

The active cutting tool control feature improves accuracy and positioning in all axes, reducing machining time and preventing excessive cutting-edge wear.

Details made using CNC and 3D printing:



a) Housing



b) Handle



c) Lid

Fig. 3.11. Manufactured elements from PHM-1κ – CNC technology.

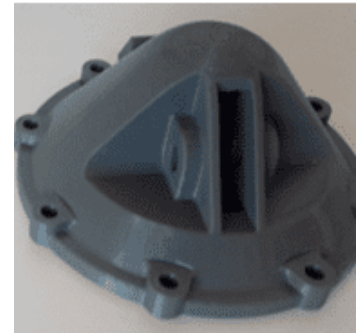
The combined use of both methods provides a balance between efficiency, accuracy and economy, optimizing both production time and mechanical characteristics. Therefore, the choice of technology should be made based on the required application, equipment dimensions and time to manufacture the parts.



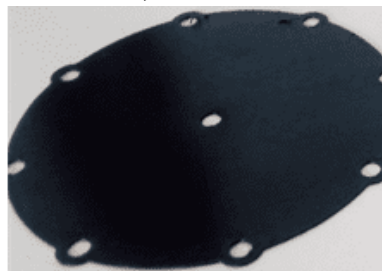
a) Housing



b) Handle



e) Lid



c) Membrane/diaphragm

Fig. 3.12. Elements made from PHM-1κ – additive technology.

3.6. Results of the static analysis of the detail of the PHM-1κ

3.6.1. Results of the static analysis of the body

The results of the static analysis of the body made of PETG, with an applied distributed load of 3 MPa, show the distribution of stresses according to the von Mises criteria (Fig. 3.13). The maximum stress reported in the model is 9.265 MPa, and it is observed in the most loaded areas, mainly around the attachment points.

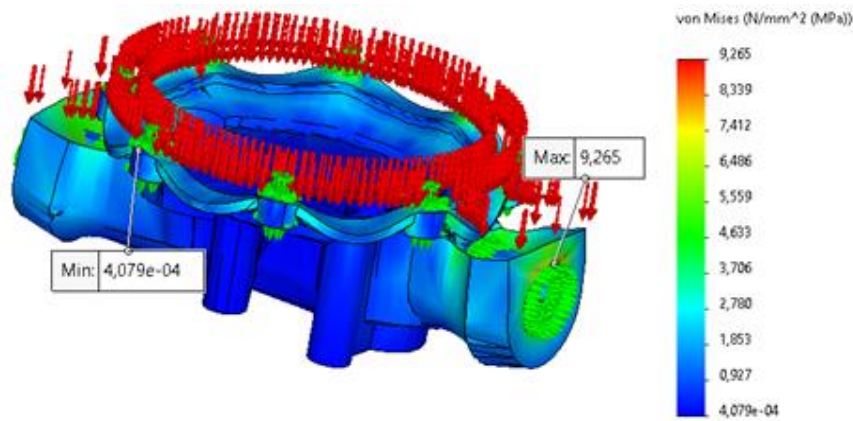


Fig. 3.13. Von Mises stress distribution for the housing at a load of 3 MPa – PETG material.

The analysis of the deformation results of the PETG shell, shown in Figure 3.14, shows the distribution of maximum displacements under an applied load of 3 MPa. The maximum displacement recorded is 0.085 mm, this value being observed in the areas furthest from the attachment points, where the shell does not receive direct support.

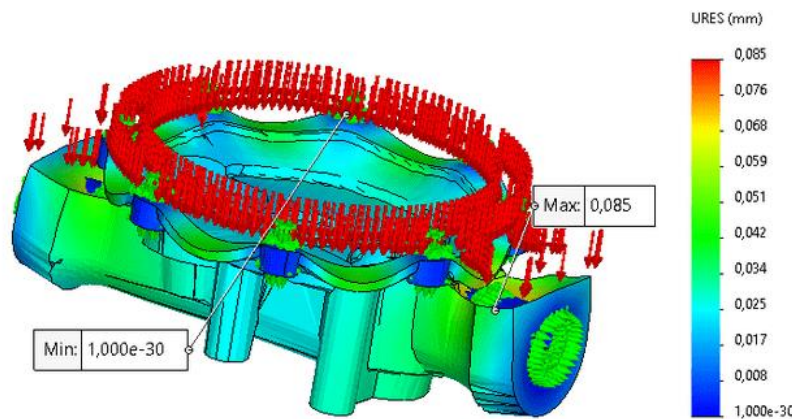


Fig. 3.14. Maximum displacements of the housing at a load of 3 MPa – PETG material.

The results of the analysis of the housing made of Alloy 4010 (AlSi7Mg) show the distribution of stresses according to the von Mises criterion at a load of 3 MPa. In Figure 3.15, the maximum stress reported in the analysis reaches a value of 9.266 MPa, this value being localized around the critical attachment points and the areas where the housing is subjected to the highest mechanical loads.

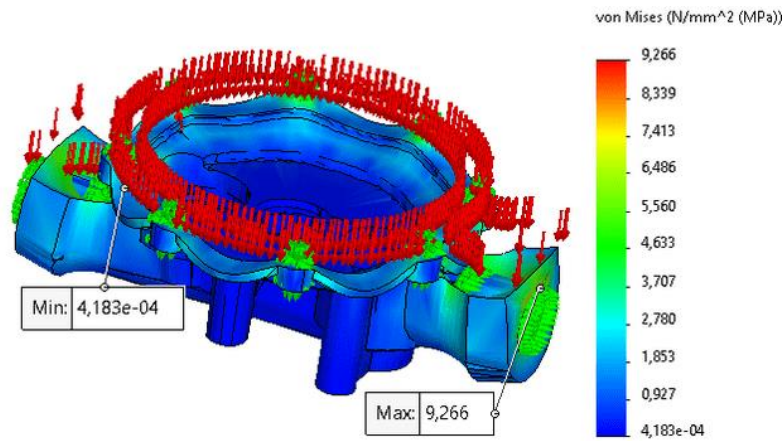


Fig. 3.15. Von Mises stress distribution for the shell at a load of 3 MPa – Alloy 4010 material.

Figure 3.16 shows that the maximum stress reaches a value of 9.266 MPa, which is concentrated in the areas around the attachment points. These are the places where the material absorbs the greatest forces and where the load is greatest.

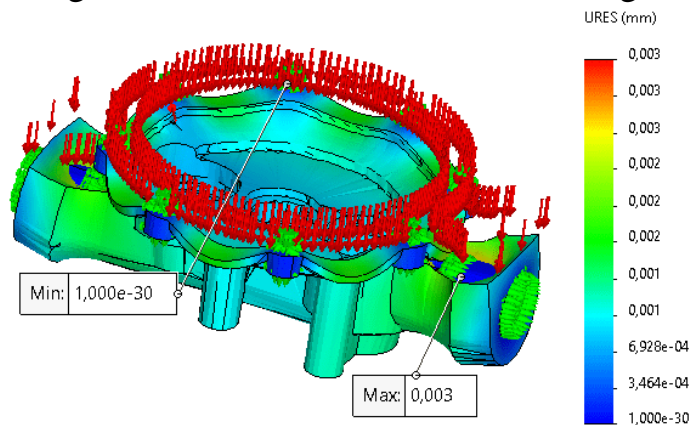


Fig. 3.16. Maximum displacements of the housing at a load of 3 MPa – material Alloy 4010.

Since the maximum stress is significantly lower than the yield strength of the alloy (about 300 MPa), we can conclude that the housing will not suffer structural damage or permanent deformation under this load.

3.6.2. Results of the static analysis of the handle

Figure 3.17 visualizes stress distribution according to the von Mises criterion. This criterion considers the total stress by combining the different load components.

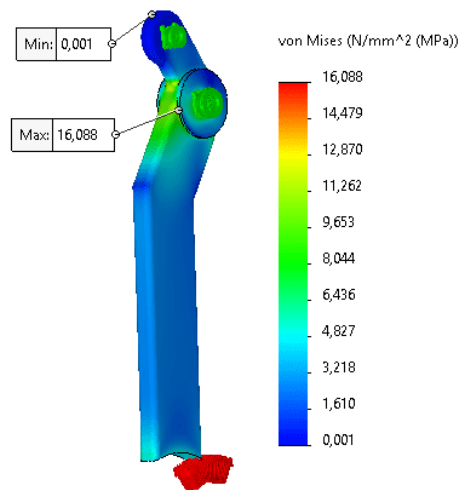


Fig. 3.17. Von Mises stress distribution for the handle at a load of 2.5 MPa – PETG material.

The results of the PETG handle deformation analysis show a maximum displacement of 0.883 mm, as presented in Figure 3.18.

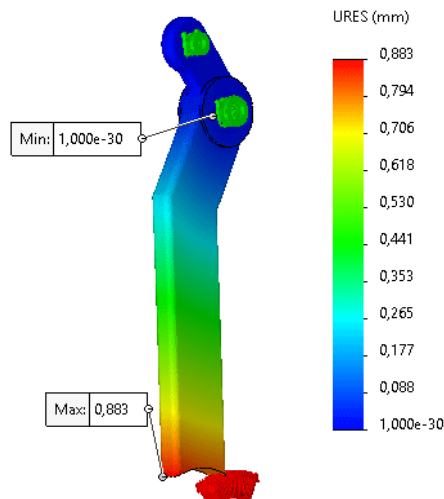


Fig. 3.18. Maximum displacements of the handle at a load of 2.5 MPa – PETG material.

Figure 3.19 illustrates the distribution of displacements across the entire handle, where a color scale from red to blue indicates the different levels of deformation. The analysis shows a maximum stress of 15.313 MPa, concentrated in the attachment area, where the handle is fixed and experiences the highest loads.

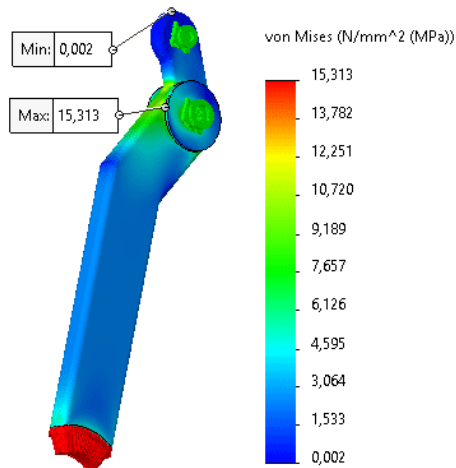


Fig. 3.19. Von Mises stress distribution for the handle at a load of 2.5 MPa – material Alloy 4010 (AlSi7Mg).

Figure 3.20 shows the maximum displacement of the handle made of Alloy 4010 (AlSi7Mg), which is 0.032 mm, measured at the free end of the handle. This value is minimal and indicates that the material demonstrates high resistance to deformation.

The comparative analysis shows that the handle made of Alloy 4010 (AlSi7Mg) exhibits significantly less displacement compared to PETG (0.032 mm versus 0.883 mm), which is due to the high strength and hardness of the aluminum alloy.

3.6.3. Results of the static analysis of the lid

The static analysis of the lid made of PETG, shown in Figure 3.21, shows the stress distribution under applied mechanical load. The maximum stress reported in the analysis is 9.487 MPa.

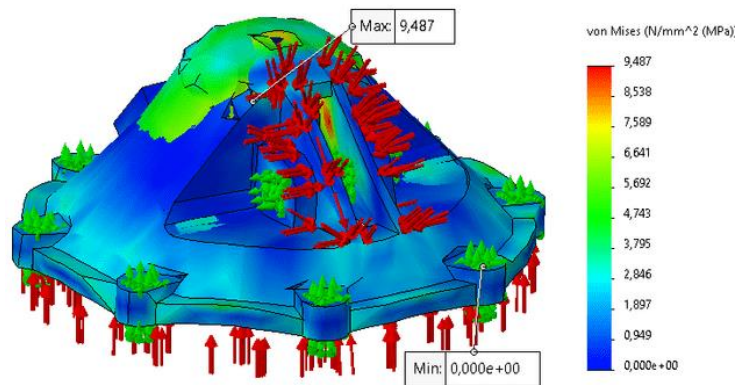


Fig. 3.21. Von Mises stress distribution for the lid at a load of 3 MPa – PETG material.

The results of the static analysis of the lid shown in Figure 3.22, made of PETG, show a maximum displacement of 0.178 mm, as illustrated in the figure.

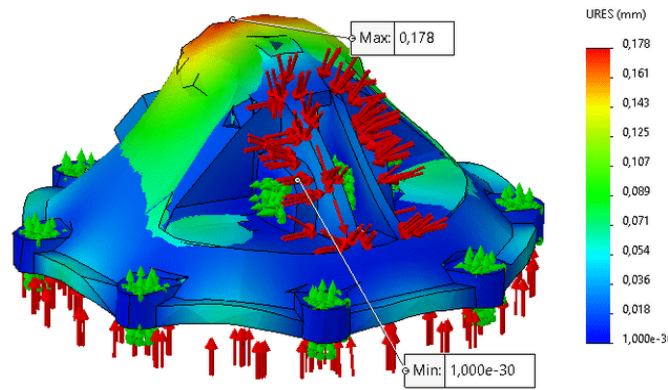


Fig. 3.22. Maximum displacements of the lid at a load of 3 MPa – PETG material.

The maximum displacement value of 0.178 mm is within the allowable limits for PETG, confirming that the lid will not suffer permanent deformation or structural failure under the current load of 3 MPa.

The analysis results of the lid made of Alloy 4010 (AlSi7Mg), shown in Figure 3.23, reveal the stress distribution under an applied mechanical load of 3 MPa. The maximum stress recorded in this model reaches 9.606 MPa, concentrated in the areas of highest load, visualized in red and orange colors.

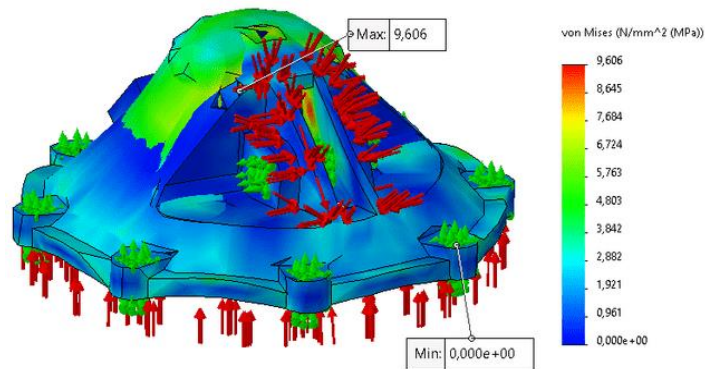


Fig. 3.23. von Mises stress distribution for the cover at a load of 3 MPa – material Alloy 4010 (AlSi7Mg).

The analysis results for the lid made of Alloy 4010 (AlSi7Mg), shown in Figure 3.24, present the strain distribution under an applied load of 3 MPa. The maximum strain reported in the model is 0.178 mm and is observed at the top of the dome structure, which is furthest from the attachment points.

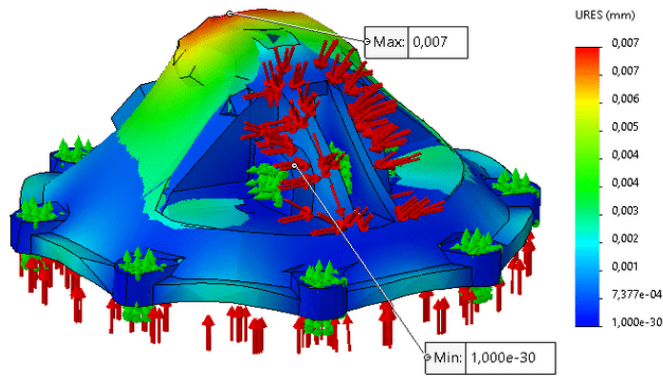


Fig. 3.24. Maximum displacements of the cover at a load of 3 MPa – material Alloy 4010 (AlSi7Mg).

Compared to PETG, the maximum stress in Alloy 4010 (AlSi7Mg) is 9,606 MPa and is also concentrated in critical areas around the attachment points. While the stress is significantly lower than that of PETG, Alloy 4010 (AlSi7Mg) has a much higher yield strength (approximately 300 MPa), making it much more resistant to stress.

3.6.4. Results of the static analysis of the Membrane/diaphragm

The results of the analysis, presented in Figure 3.25, show that the maximum stress in the diaphragm reaches 7.48 MPa, with this stress visualized in red areas around the areas with the highest concentration load.

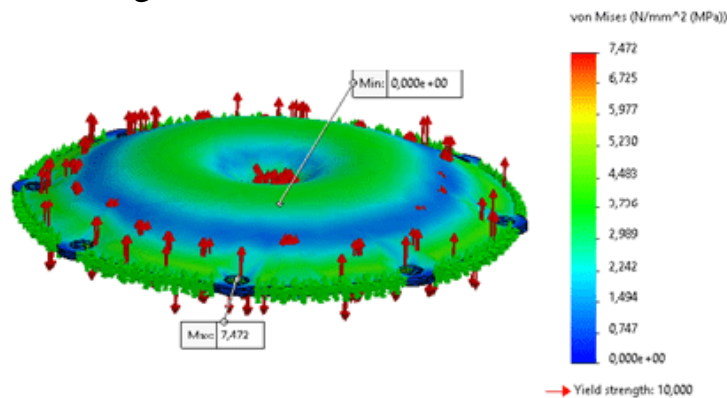


Fig. 3.25. Distribution of von Mises stresses on the diaphragm at a load of 3 MPa – material TPU 70.

Figure 3.26 shows the distribution of displacements over the diaphragm surface. The maximum diaphragm displacement is 0.169 mm, recorded in these areas due to the lack of immediate support.

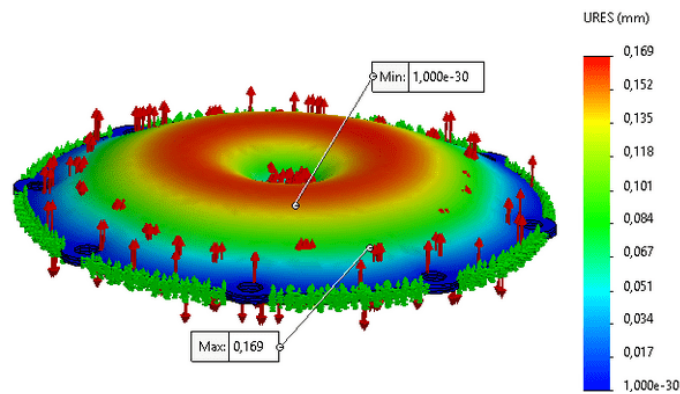


Fig. 3.26. Maximum diaphragm displacements at a load of 3 MPa – material TPU70.

The analysis shows that the diaphragm withstands the applied load and remains within safety limits, maintaining both its functionality and mechanical integrity. This makes it reliable for use under the specified operating conditions.

The summarized results of the static analysis of the structural components – the housing, the handle, the cover and the diaphragm – demonstrate their mechanical characteristics and behavior under the applied loads. Each of the parts is made of a suitable material, such as PETG, Alloy 4010 (AlSi7Mg), TPU 70 is suitable for the diaphragm.

3.7.1. Comparison of PETG and Alloy 4010 (AlSi7Mg) materials for the components of PHM-1k

In the analysis of the main components of the PNM-1k – handle, body and cover – a comparison was made between two materials: PETG and Alloy 4010 (AlSi7Mg). Table 3.1 shows the main properties of the two materials, which are of key importance in the analysis of their mechanical characteristics:

Table 3.1. Mechanical properties of the materials used.

Свойство	PETG	Alloy4010 (AlSi7Mg)
Якост на опън (MPa)	50-60	~300
Еластичен модул (GPa)	2-2,5	100-120
Плътност (g/cm ³)	1.27	7,85
Удължение при скъсване (%)	6-10	~12
Устойчивост на удар (J/m ²)	Висока	Средна

Depending on the operating conditions, the choice of material for the components of the PNM–1k should be made considering the specific mechanical requirements and the working environment.

Conclusions to the third chapter

1. The body, handle, cover and diaphragm of the PNM–1k part were analyzed using the finite element method (FEA) in SolidWorks. The static analysis showed stress concentration in areas with maximum load.

2. The choice of material is decisive for reliability: PETG is suitable for lower loads; Alloy 4010 (AlSi7Mg) provides high stability and minimal deformations; TPU 70 is optimal for the diaphragm, thanks to its strength and durability.

3. The analysis outlined the critical areas and potential weaknesses of the structure. To ensure durability, it is recommended to monitor the areas with high stresses and implement structural improvements.

CHAPTER FOUR

OPPORTUNITIES FOR INCREASING CAPACITY FOR UNSCHEDULED REPAIRS

4.1. Experimental study of the functional compatibility of a part manufactured using innovative technologies

The study is focused on validating the geometric accuracy, structural integrity and functional behavior of the manufactured components, comparing them with the original unit. This includes both bench tests and real integration into the fuel system of specialized equipment – MAZ-537G.

The tests were structured in the following order:

– visual inspection of the experimental samples of the pump PHM-1к and comparison with an existing original part, to establish correspondences and deviations in the geometry, structural elements and surface treatment (Fig. 4.1).

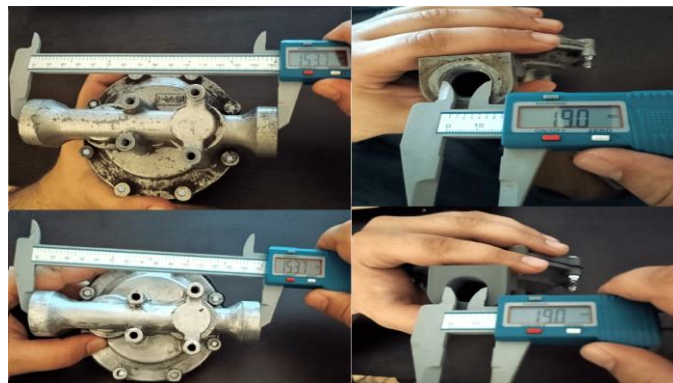


Fig. 4.1. Visual inspection and comparison of restored samples with the original component PHM-1к.

– installation of the two restored specimens, created using innovative technologies (3D printing and CNC machining), on bench equipment for preliminary testing in a controlled environment (Fig. 4.2).

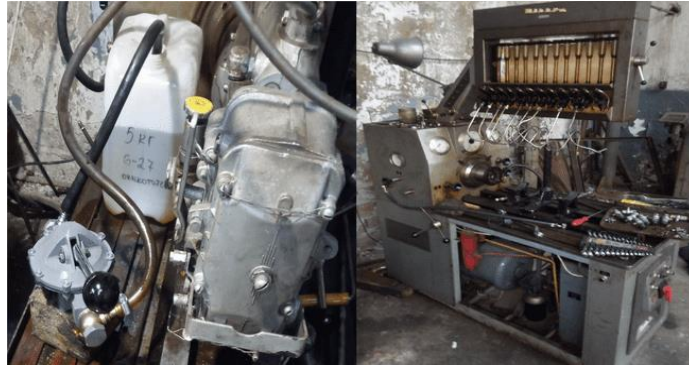


Fig. 4.2. Mounting of the reconstructed specimens, created by 3D printing and CNC machining, on benchtop test equipment.

– assessment of the pressure created by the restored samples, compared with the reference values recorded for the original component (Fig. 4.3 and Fig. 4.4);

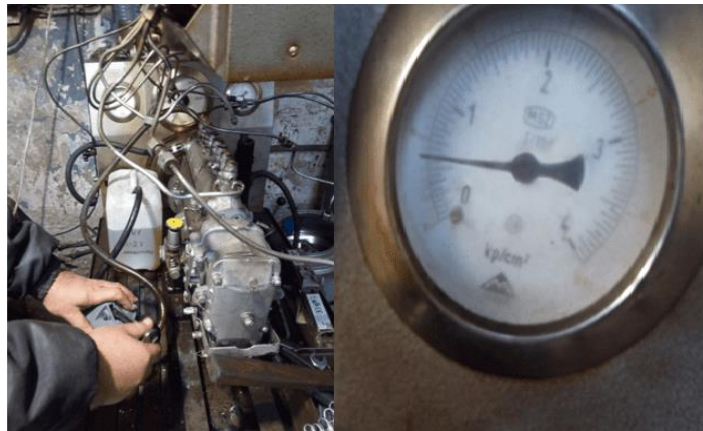


Fig.4.3. Testing a fuel pump created through 3D printing, with measurement of the pressure created.

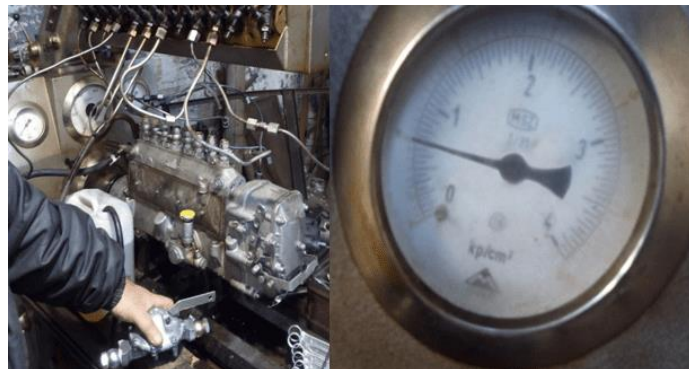


Fig.4.4. Testing a fuel pump created through CNC machining and 3D printing, with visualization of the pressure created.

– dismantling of the original fuel-priming pump from the MAZ-537G fuel system in order to provide an opportunity for real testing of the created PNM-1K models, using innovative technologies in the fuel system of military equipment (Fig. 4.5);



Fig. 4.5. Placing the restored PNM-1k samples on the fuel system of the MAZ-537G.

– functional testing of the created samples in the fuel system of the MAZ-537G, with an emphasis on smooth operation, synchronization of components and load resistance; – reverse disassembly of the experimental pumps and subsequent assembly of the original PNM-1k, for the purpose of comparative analysis of behavior under similar conditions; – functionality verification using a manual drive, which allowed monitoring of the mechanical reaction at startup, the ability to create pressure and the smooth operation of the unit.

4.2. Opportunities for increasing the capacity for performing unscheduled repairs by implementing innovative technologies

Experimental studies using 3D printing (FDM) and CNC machining show a real possibility for manufacturing components of the PHM-1k unit, functionally comparable to the original parts. This offers an alternative approach to technical support for military units in conditions of limited or difficult supply. Fig. 4.6 presents a modular scheme of the hybrid production process, illustrating the sequence from digitalization and prototyping to processing, assembly and testing.

4.2.1. Comparative analysis of 3D printing and CNC machining

Figure 4.7 presents a visualization of the basic technological sequence for both technologies, clearly highlighting the differences between the additive and subtractive manufacturing processes, originating from a single CAD model.



Fig. 4.7. Visualization of the technological algorithm for 3D printing and CNC machining.

To achieve better objectivity in the assessment, Table 4.1 compares the main technical and economic indicators obtained as a result of real experimental tests with restored components produced using the two technological methods - additive manufacturing (3D printing) and subtractive machining (CNC machines).

Table 4.1. Comparative analysis of technical and economic indicators in 3D printing and CNC machining of PHM-1k components.

№	Параметър	3D печат (FDM)	ЦПУ обработка
1	Технология	Адитивна	Субтрактивна
2	Материал	PETG филament	Алуминиева сплав
3	Маса на входния материал (kg)	0.277	1.01
4	Маса на отпадък (kg)	0.0375	0.521
5	Време за изработка (min)	819	4035
6	Енергийна консумация (kWh)	1.9	5.1
7	Възможност за повторна употреба	Висока (преизползваем филament)	Ниска (стружка, трудна за рециклиране)

The findings of the comparative analysis confirm that 3D printing is the preferred solution for prototyping, low mechanical loads and situations requiring fast response. In turn, CNC machining remains the leader in the manufacture of parts that require high precision and structural strength.

4.2.2. Estimation of production time

To estimate the production time, an averaging method was applied, considering different combinations of printers, materials and technological environment. The analysis showed that the handle of the PNM-1K is manufactured in the shortest time both with FDM printing – an average of 70 minutes (Fig. 4.8) and with CNC machining – an average of 76 minutes (Fig. 4.9 and 4.10).



Fig. 4.8. Time for 3D printing of individual components of the PHM-1k, manufactured using FDM technology.

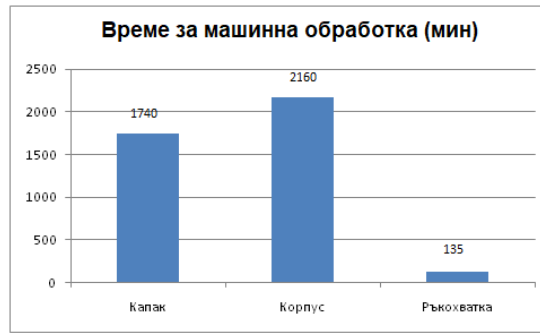


Fig. 4.9. CNC machining time of individual components of PNM-1k, manufactured using Mazak SmoothTech – from a blank.



Fig. 4.10. CNC machining time of individual components of PNM-1k, manufactured using Mazak SmoothTech – from castings.

These results confirm that the choice of technology and type of workpiece have a significant impact on production time, with the additive method being faster for small and complex geometries, and the subtractive method being faster for larger series and metal elements.

4.3. Algorithm for selecting innovative technology in the manufacture of parts

Algorithm presented in Fig. 4.11 serves as a basis for deciding on the choice between additive technologies (3D printing) and machining with CNC machines, depending on the geometry, functions and critical areas of the respective element.

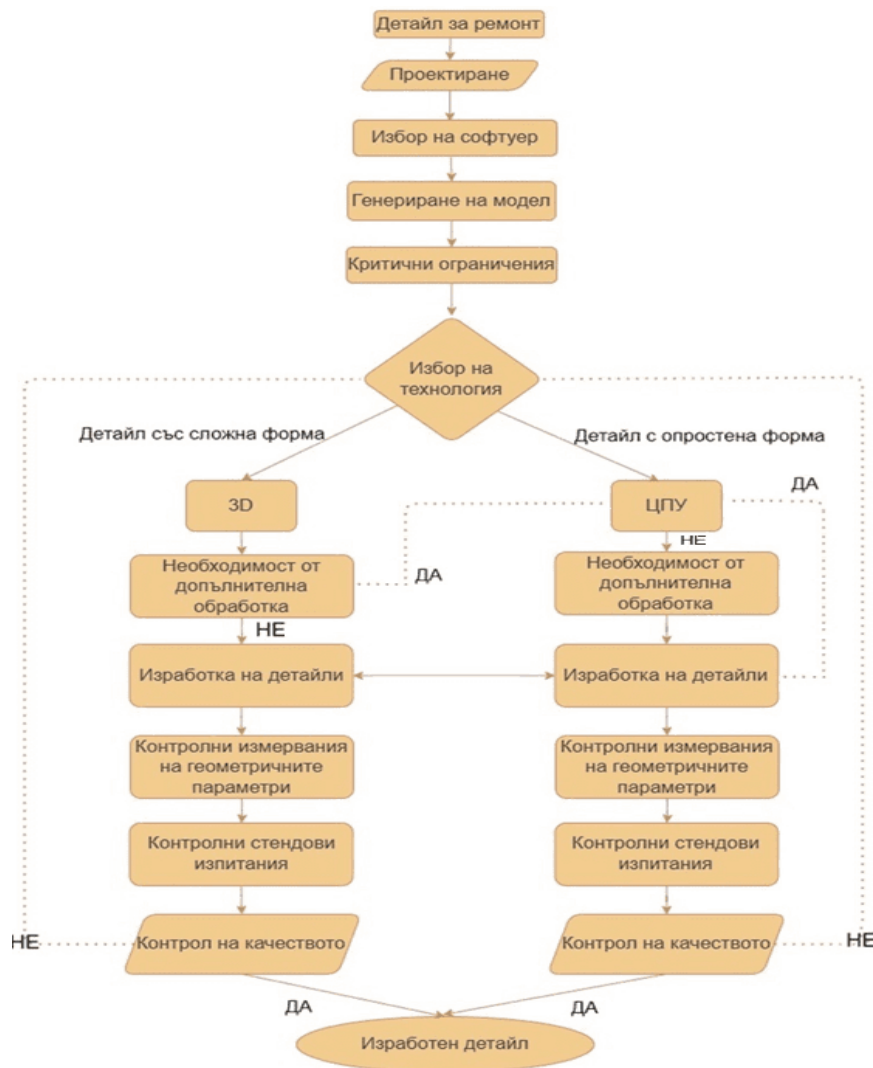


Fig. 4.11. Algorithm for selecting parts for manufacturing using innovative 3D (FDM) and CNC machines.

4.4. Application in specific repair situations Conclusions to chapter four

1. Innovative technologies – 3D printing (FDM) and CNC machining – are establishing themselves as an effective alternative to traditional logistics networks for spare parts.

2. In conditions of limited access or high cost of original components, the application of 3D printing and CNC machining in military conditions provides an economically advantageous and operationally flexible solution.

3. CNC machining allows the use of various metals and polymers, while in additive manufacturing the selection of appropriate filaments and composites increases efficiency and reduces costs along the logistics chain.

4. The algorithm for selecting and manufacturing parts using innovative technologies offers structured and reliable management of the repair process.

Conclusion to Chapter Four:

The combined use of 3D printing and CNC machining transforms traditional repair and restoration activities in the conditions of military and crisis logistics. Experiments and analyses prove a reduction in production time, a reduction in costs and an increase in the autonomy of repair formations. The integration of these technologies provides critical advantages in unscheduled repairs and outlines prospects for their future implementation as part of the strategic concept for maintenance and sustainability of the armed forces.

General conclusions:

1. The dissertation work has carried out an in-depth analysis of the technical maintenance and repair systems in the armed forces of Bulgaria and NATO member states, identifying the main challenges and limitations.

2. The need for integration of modern manufacturing technologies – 3D printing and CNC machining – to increase the capacity for unscheduled repairs and reduce the time for restoring equipment is substantiated.

3. A comprehensive technological process has been developed for the restoration of fuel system components through CAD modeling, simulations, 3D printing and CNC machining.

4. It has been experimentally proven that 3D printed parts from PETG and CNC machined elements from Alloy 4010 (AlSi7Mg) can successfully replace original parts under certain operating conditions.

5. Specific opportunities for implementing innovative technologies in repair formations at tactical and operational levels are proposed, including the creation of a CAD/CAM database, the use of FDM printers in field conditions, and the implementation of CNC centers and SLA/SLS systems in stationary structures. The combination of 3D printing and CNC processing, combined with personnel qualification and automation, leads to a significant increase in the repair capacity and resilience of the armed forces.

3. SCIENTIFIC-APPLIED AND APPLIED CONTRIBUTIONS

3.1. Scientific-applied contributions

1. A technological sequence for emergency repairs through local production has been developed, applicable in the formations of the Bulgarian Army.

2. The applicability of high-strength polymers and metal alloys for spare parts subjected to loads typical of armored vehicles has been experimentally proven.

3. A methodology for integrating additive and subtractive manufacturing in repair and maintenance systems has been created, based on an assessment of resources and operational requirements.

4. Criteria for assessing the economic efficiency of implementing modern production technologies in military repairs have been formulated.

3.2. Applied contributions

1. The strength characteristics of the manufactured elements have been determined using CAD/CAM software, in accordance with the design and operational requirements.

2. A virtual 3D model of the fuel injection pump PHM-1K has been created, validated through strength simulations and applied in experimental restoration of damaged components.

3. A comprehensive practical process for the production and analysis of components using FDM printing and CNC machining has been implemented, proving the technological applicability of the methods in field conditions.

4. Conditions and parameters have been formulated under which modern technologies can reliably replace traditional methods for repairing weapons and equipment.

4. SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE DISSERTATION

1. Чиликов В.Г. „Модернизация и усъвършенстване на способностите на ремонтните формирования от състава на Сухопътни войски” Международна научна конференция „ХЕМУС–22 – отбрана, антитероризъм и сигурност” гр. Пловдив – сборник доклади 2022 : гр. София: ISBN:1312-2916.

2. Чиликов В.Г. „Организация на ремонтно-възстановителната дейност в страните членки от Алианса” Международна научна конференция „ХЕМУС–22 – отбрана, антитероризъм и сигурност” гр. Пловдив – сборник доклади 2022: гр. София: ISBN:1312-2916.

Acknowledgements:

The author expresses his deep respect and gratitude to his scientific supervisor, Associate Professor PhD Eng. Ivan Nikolaev Minevski. I thank my colleagues who helped and supported my work until its completion through advice.

The abstract does not contain classified information.

ABSTRACT

The dissertation explores the potential for enhancing the capacity of unscheduled field repairs through the integration of modern manufacturing technologies. The focus is placed on the application of 3D printing and CNC machining for the production and restoration of critical military equipment components. A comprehensive technological process has been developed – from CAD modeling and simulations, through prototyping and mechanical machining, to the experimental validation of the manufactured parts. The experimental results demonstrate that 3D-printed components made of PETG and CNC-machined elements from aluminum alloy can successfully replace original parts under specific operational conditions.

Practical guidelines are proposed for implementing these technologies at both tactical and operational levels, including the creation of a CAD/CAM database, the use of FDM printers in field conditions, and the integration of CNC centers and SLA/SLS systems in stationary facilities. The combination of 3D printing and CNC machining, supported by personnel training and automation, has been proven to increase the efficiency of repair activities and the resilience of the armed forces.