

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ ФАКУЛТЕТ ПО ТРАНСПОРТА Катедра "Механика"

маг. инж. Морис Патрик Швикер

ВЛИЯНИЕ НА РОТАЦИОННИТЕ СТЕПЕНИ НА СВОБОДА НА ШЕСТ-ОСЕВ РОБОТ ВЪРХУ ЯКОСТТА НА ОПЪН НА ПРОБНИ ТЕЛА, ПРОИЗВЕДЕНИ ЧРЕЗ ЕКСТРУДИВНО ПОСЛОЙНО ИЗГРАЖДАНЕ

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен "ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1. "Машинно инженерство"

Научна специалност: Строителна механика и съпротивление на материалите

Научен ръководител: доц. д-р инж. Николай Николов

СОФИЯ, 2022 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра "Механика" към Факултет по транспорта на ТУ – София на редовно заседание, проведено на 28.06.2022 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 04.10.2022 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.1-66 /20.07.2022 г. на Ректора на ТУ – София в състав:

- 1. проф. дн инж. Иван Младенов Кралов, ТУ София, председател,
- 2. проф. дн инж. Георги Димитров Тодоров, ТУ-София, научен секретар,
- 3. проф. дн инж. Венелин Стоянов Живков, пенсионер,
- 4. проф. дн инж. Климент Благоев Хаджов, ХТМУ,
- 5. доц. д-р инж. Димитър Петков Караиванов, ХТМУ

Рецензенти:

- 1. проф. дн инж. Венелин Стоянов Живков
- 2. проф. дн инж. Климент Благоев Хаджов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет по транспорта на ТУ – София, блок № 9, кабинет № 9310.

Дисертантът е докторант в самостоятелна форма на обучение към катедра "Механика" на Факултет по транспорта. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор:	маг. инж.	Mo	рис Швикер						
Заглавие:	Влияние	на	ротационните	степени	на	свобода	на	шест-	осев
	робот вър	oxy	якостта на опъ	н на проб	бни	тела, про	ЮЗВ	едени	чрез

екструдивно послойно изграждане

Тираж: 30 броя

Отпечатано в Издателство на Технически университет – София

І. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Адитивното производство служи за производството на прототипи и на готови изделия. Методът екструдивното послойно изграждане (Fused Layer Manufacturing, FLM) създава 2½-измерни нишки чрез отлагане на термопластичен материал, при чието свързване и натрупване се изгражда физически детайл. Използваните машините обикновено имат само линейни задвижвания по осите X, Y и Z, което ограничава стратегиите за формиране на слоеве, създава анизотропия и стъпаловидни повърхности.

Възможен подход за усъвършенстване на адитивното производство, базирано на чрез FLM процес, е използването на кинематиката на шест-осев робот. Допълнителните ротационни степени на свобода на робота правят възможно накланянето на дюзата на екструдера спрямо основата, позволявайки изцяло триизмерен подход към стратегиите за формиране на слоеве. Премахва се необходимостта от поддържащи структури при изграждане на детайли с издатини и се намалява времето за изграждане, създават се условия за повишаване качеството на повърхностите и якостта на детайлите. Отваря се път за хибридно производство, при което детайлите могат да бъдат изградени директно върху съществуващи структури, например при създаване на свързващи елементи.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационния труд е *да се създаде система за екструдивно пос*лойно изграждане с 6-осев индустриален робот, да се изследва влиянието на допълнителните степени на свобода върху свойствата на произведените пробни тела и да се получи оптимален набор от работни параметри за производството на детайли с максимална якост на опън.

За изпълнението на тази цел се поставят се следните задачи:

- Да се извършат предварителни изследвания с конвенционален 2¹/₂-измерен принтер и да се установят оптималните параметри на изходния процес за екструдивно послойно изграждане;
- Да се разработи система за екструдивно послойно изграждане, включваща 6-осев индустриален робот (ARMS) и позволяваща директното изграждане на свързващи детайли "на място";
- Да се разработят методики: за работа с ARMS; за изработване на пробни тела с подходяща форма; за изпитване на пробните тела на опън;
- Да се проведат експериментални изследвания за установяване влиянието на параметрите на процеса при използване на ARMS върху якостта на опън и да се предложат оптимални набори от параметри;
- Да се създаде числен модел с крайни елементи за прогнозиране на якостно-деформационното поведение при опън на изградени с FLM процес детайли. Моделът да се апробира с резултати от експериментите.

Научна новост

Проектирана и изработена е роботизирана система за адитивно производство на детайли посредством екструдивно послойно изграждане. Разработени са методики за работа със системата, за получаване и изпитване на пробни тела. Определени са оптималните стойности на параметрите на процеса, от гледна точка на якостно-деформационните свойства на получените детайли.

Практическа приложимост

Създадената роботизирана система, заедно разработените методики за работа с нея и предложените оптимални стойности на основните параметри на процеса, може успешно да използва за производството на детайли със сложна форма, както и в хибридни производства – за принтиране на свързващи елементи "на място".

Експериментално е получена богата информация за якостно-деформационните свойства на шприцвани и послойно изградени пробни тела, както и на изходния материал – филамент. Използвани са разнообразни комбинации от параметри на FLM процеса, приложени на два вида системи за изграждане – конвенционална и роботизирана.

Създаден е числен модел за якостно-деформационни анализи на пробни тела, произведени чрез адитивно послойно изграждане, с използване на данните от експерименталните изследвания.

Апробация

Всички експерименти са проведени в лабораториите на Университета по приложни науки – Кайзерслаутерн, Германия, при спазване на съответните изисквания.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 4 броя научни статии. Те са докладвани през 2021 г. на конференциите *TechSys*, *ICMERR* и *ICNME* и са приети за публикуване в индексирани в Scopus издания: AIP Conference Proceedings (SJR), International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research (Q3, 2 броя) и Materials Science Forum (Q4).

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 165 страници, като включва увод, 5 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списъци на използваната литература и на публикациите по дисертацията. Цитирани са общо 91 литературни източници, всичките на латиница. Работата включва общо 119 фигури и 15 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съвпадат с тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

1.1. Същност адитивното производство чрез екструдиране

Терминът "екструдиране" се отнася до процеси, при които се получава мек нагрят термопласт. Този материал преминава през една или повече дюзи и получената нишка се отлага върху печатна плоча. Топлинната енергия в материала е достатъчна за стопяване на основата, която след охлаждане образува трайна връзка със следващия слой. Контурите се изграждат чрез движение на дюзите в равнина xy (2D). Третото измерение не се използва като непрекъсната z-координата, а служи за отместване на плочата при формиране на отделните слоеве. Реално процесът има две измерения и половина (2½D), макар че обикновено се нарича 3D принтиране. Фигура 4 илюстрира базовия FLM процес.



Фигура 4. Схематично представяне на процеса FLM.

Екструдираният материал се втвърдява при охлаждане, вследствие на топлообмен с околната среда. Затова процесът FLM е подходящ за материали с висока температура на топене и ниска топлопроводност, най-често восъци и пластмаси. Добавянето на втора дюза позволява изграждането на хибридни детайли с различни цветове или специфични механични свойства. Много FLM системи използват втората си дюза за изграждане на опорни конструкции от различен материал, когато това е необходимо.

Процесът FLM е свързан с редица ограничения и предизвикателства. Структури, които са по-фини от минималната ширина на екструдиране, не могат да бъдат принтирани в равнината *xy*. Разделителната способност по ос *z* е ограничена от височината на слоя. Тъй като нишките са с кръгово сечение, не могат да се получат остри ъгли в принтирания детайл. Предизвикателства представляват скоростта на принтиране, която зависи от скоростта на движение на дюзата и от дебита на материала; образуването на мустаци; изкривяването на принтирания детайл; запушването и износването на дюзата, анизотропията в механичните свойства, поддържащите структури и др.

1.1.1. Информационен поток на процеса FLM

Пътят на информацията от идеята до принтирания детайл е показан на фиг. 6. Той включва виртуална и реална част. Виртуалната част обхваща генерирането и визуализирането на идеята в CAD-система, преобразуването през универсален файлов формат (STL), обработката със софтуер за генериране на слоеве, получаването на машинен G-код. Физическата част включва принтирането с FLM принтер и премахването на поддържащия материал.



Фигура 6. Информационен поток на процеса FLM.

В Глава 1 е направен детайлен преглед на елементите на процеса FLM:

• 1.1.2. *Файлов формат STL* – същност, предимства и недостатъци. STL представлява универсален, но прост математически метод за описване на сложни триизмерни детайли чрез повърхнини, съставени от триъгълници;

- 1.1.3. *Машинен G-код* последователност от команди, които се изпълняват от машините с цифрово-програмно управление, включително за целите на триизмерното принтиране;
- 1.1.4. Софтуер за генериране на слоеве същност и възможности. Това е основният софтуер за процеса. Той създава слоевете за принтиране и последователността от команди, които трябва да изпълни принтиращата машина. Позволява различни ориентации на детайла в пространството, в търсене на решение с минимална необходимост от поддържащи структури фиг. 8.



Фигура 8. Влияние на ориентацията върху поддържащите структури (собствено изследване).

 1.1.5. Настройки при генерирането на слоеве – по софтуерен път могат да се настройват над 100 параметъра, основните от които са дадени на фиг. 9. Стойностите на тези параметри по отделно и в съвкупност оказват голямо влияние върху качеството на изградения детайл. За достигането до оптимален набор от параметри са необходими продължителни проучвания, натрупване на практически опит и провеждане на многофакторни експерименти, каквито са правени и в настоящия дисертационен труд. Основните настройки са анализирани в детайли и са илюстрирани техните влияния. Например, на фиг. 10 са показани ефектите на някои от настройките, свързани с геометрията и слоевете, върху структурата на детайла.

1.2-1.3.2. Състояние на изследванията, свързани с процеса FLM

Поради многообразието от възможности, предлагани от наличните на пазара софтуерни и хардуерни решения за FLM принтиране, стандартизирането и оптимизирането на процеса са затруднени, а изследванията са свързани основно с якостта, геометричната точност, качеството на повърхнините, стабилността на процеса и др. Особено внимание в литературния обзор е отделено на възможностите за реализиране на многоосев FLM процес и на ефектите, които допълнителните степени на свобода оказват върху качеството на произведените детайли. В разгледаните литературни източници обикновено се използват

задвижвания с 4, 5 или (най-често) с 6 степени свобода, които могат да се постигнат с употребата на индустриален робот. Възможността дюзата да се движи във всички направления може да донесе много ползи, като обикновено се акцентира на елиминирането на поддържащите структури и на намаленото време за изграждане. Изцяло триизмерният подход позволява да отлагат неравнинни слоеве, с което се намалява стъпаловидният ефект и се подобрява качеството на повърхнините. Непрекъснатото отлагане на повърхностните слоеве (с намален стъпаловиден ефект) позволява уякчаване и вкоравяване на цялата структура, като в литературата се споменава за 59% увеличаване на границата на провлачане и 9% увеличаване на модула на еластичност. Уякчаващ ефект се постига и чрез промяна на направлението на екструдиране.



Фигура 9. Настройки в софтуера за генериране на слоеве.



Фигура 10. Ефекти от параметри на процеса FLM (собствено изследване): (а) Диаметър на дюзата и ширина на екструдиране; (b) Височина на слоя; (c) Запълване; (d) Шарки: ортогонална, мрежеста, триъгълна, зигзагообразна, бърза пчелна пита, пълна пчелна пита; (e) Припокриване на пълнежа.

1.3.4.–1.3.5. Геометрични параметри на роботизирания FLM процес

На фиг. 18 са показани векторите, които са важни за процеса FLM: нормален на печатната плоча вектор n, нормален на слоевете вектор b (посока на изграждане), ос на дюзата e, гравитационен вектор g. При класическия FLM процес ъгълът γ е равен на нула, а векторите n, b и e са успоредни помежду си и перпендикулярни на печатната плоча. Задвижването на дюзата с 6-осев робот позволява да се реализират различни направления на n, b и e, като се управляват ъглите α , β и γ :

- α позволява изграждане без поддържащи структури и печатане извън обема над печатната плоча, чрез промяна на посоката на изграждане *b*;
- β позволява накланяне на оста на дюзата *е* спрямо вектора на скоростта *v*.
 По този начин се влияе на напречното сечение на екструдираната нишка и на структурата на изграждания детайл.
- у позволява директно изграждане върху съществуващи повърхности с произволна ориентация в пространството.



Фигура 18. Базови геометрични параметри на процеса FLM.

Кинематичните особености на робота също са обект изследване. В литературата е показано, че роботите имат по-ниско ускорение от линейните задвижвания на конвенционална FLM система, което може да повлияе на получената структура и на якостта. Освен това, точността на траекторията на индустриалния робот е много по-ниска от тази на типичната 2½D система. Това може да повлияе на свързването на слоевете, особено при по-малки диаметри на дюзата. Затова е необходимо да се направят измервания на действителните работни движения и да се изследва тяхното влияние върху якостта.

1.4. Якост на опън на структури, получени чрез FLM процес

Публикациите, посветени на якостта на опън на FLM и анизотропните материали, според основния си подход, са обобщени и разгледани в три групи:

- *Експериментални*, частично допълнени с планирани експерименти, компютърна томография или микроскопски изображения;
- Моделиране с числени методи, с последваща верификация на резултатите;
- Аналитични, използващи класическия подход, при който напреженията се пресмятат чрез площта на напречното сечение.

Класическите експериментални методи се срещат често в съвременните изследвания. Те са подходящи за верификация, но изискват внимателно планиране и провеждане на експериментите. Методът на крайните елементи (МКЕ) се използва за изучаване и прогнозиране поведението при натоварване на детайли, произведени с процеса FLM, при което се получава добро съответствие с експерименталните резултати. Методът изисква големи изчислителни ресурси, които зависят от гъстотата на мрежата и стъпката при решаване на задачата. Classical Laminate Theory (CLT) се използва често при изследване на механичните свойства ортотропни композити, съставени от слоеве от различни материали. CLT може да се адаптира за структури, изградени чрез FLM метод, които също са на слоеве, но това поражда предизвикателства, свързани с взаимодействието между отделните слоеве. Методът Unit Cell, използван в изчислителната микромеханика, също може да се пригоди за FLM структури. За целта единичните клетки трябва се използват за прехвърляне на механичните свойства на материала от микро към макро ниво. Този подход може да спести изчислителни ресурси и да позволи изследването на сложни детайли и конструкции, но практическата реализация е сложна и изисква разработването на специализиран софтуер. При класическия аналитичен подход нормалното напрежение се пресмята, като силата се раздели на площта, върху която действа. Ако действителната площ на напречното сечение на FLM структурата се определи правилно, се получават близки до експерименталните резултати.

В настоящата дисертация са използвани основно класически експериментални методи, частично подкрепени с планирани експерименти. МКЕ е използван за симулиране на изпитването на опън, като е изграден триизмерен модел на дискретната геометрия на принтираната структурата и са използвани експериментално получените свойства на материала.

1.5. Цел и задачи

Цел дисертацията е да се изследва как допълнителните степени на свобода на индустриалния робот (ъгли α , β и γ от фиг. 18) и кинематиката на робота влияят върху якостта на пробни тела, произведени чрез FLM процес, и да се предложат оптимални набори от работни параметри. За постигането на тази цел са формулирани следните задачи:

1. Извършване на първоначални проучвания с базов PLA консуматив и конвенционален 2¹/₂D принтер:

- а) Проверка на повторяемостта при настройки по подразбиране;
- b) Определяне на оптимални параметри на началния FLM процес;
- с) Получаване на референтни механични свойства.

2. Разработване и въвеждане в експлоатация на роботизирана система за адитивно производство (ARMS), за изграждане на свързващи детайли "на място".

3. Разработване на методики за работа с FLM принтер и с ARMS, както и за изпитване на опън, вкл. създаване на подходяща геометрия на пробните тела.

4. Експериментални изследвания за получаване на оптимални по отношение на якостта набори от работни параметри, след установяване на ефектите от:

- а) Наклон на изграждания слой ъгъл α;
- b) Наклон на дюзата ъгъл β ;
- с) Наклон на печатната плоча ъгъл у;
- d) Точност на траекторията при ARMS и 2½D система;
- е) Влиянието на припокриването на пълнежа и дебита.

5. Създаване на числен модел с крайни елементи за прогнозиране на якостнодеформационното поведение при опън на FLM образци и верифициране с получените експериментални резултати.

ГЛАВА 2. ИЗСЛЕДВАНИЯ С КОНВЕНЦИОНАЛЕН 21/2 ПРИНТЕР

2.1.-2.4. Оптимизиране параметрите на процеса FLM за постигане максимална якост на изградените структури

Преди разработването на ARMS е необходимо да се натрупа солидна информация и опит за общите параметри на процеса FLM. Затова е проведен планиран експеримент за намиране на оптимален набор от параметри на 2½D FLM процеса, с които се получава максимална якост на изградените структури.

Използваният софтуер за генериране на слоеве Simplify3D[®] позволява настройване на около 100 параметъра. При планирането на експеримента трябва да се заложи минимален, но достатъчен брой пробни тела, които да се произведат и изпитат. За целта трябва да се определят онези параметри, които влияят най-много върху якостта и да се дефинират техните долни (L) и горни (H) граници. Резултатите от тази селекция са показани в таблица 1.

$\mathcal{N}_{\underline{o}}$	Параметър	Означение	Долна граница (L)	Горна граница (H)	
1	Диаметър на дюзата	d_N	0,3 mm	0,5 mm	
2	Множител на диаметъра	W_E	$0,9 imes d_N$	$1,1 \times d_N$	
3	Височина на слоя	h_l	0,1 mm	0,3 mm	
4	Плътност на запълване	Ι	50%	90%	
5	Припокриване на пълнежа	O_I	15%	35%	
6	Скорост на принтиране	v	1000 mm/min	3000 mm/min	
7	Температура на екструдиране	T_E	200 °C	220 °C	
8	Температура на плочата	T_B	70 °C	90 °C	
9	Посока на горен и долен слой	O_P	0°	90°	
10	Шарка	<i>P</i> #	1 – Ортогонална; 2 3 – Триъгълна; 4 –	– Мрежеста; Пълна пчелна пита	

Таблица 1. Параметри на процеса FLM, включени в планирания експеримент.

Пробните тела са изградени с принтер RF2000, фиг. 27. Изходният материал е филамент Verbatim© PLA, Ø2,85 mm. Изпитването на опън е проведено с машина Zwick 1475, при стайна температура, със скорост на деформиране 1 mm/min в еластичната и 20 mm/min – в пластичната област. Пробното тяло съответства на стандарт ISO 527-1А. Използвани са само данните от пробни тела, разрушили се в мерната дължина. За планиране на експеримента е използван статистическият софтуер Minitab[®].



Фигура 27. Постановка на експеримента: а) Renkforce RF 2000 и компютър със софтуера Simplify3D®; b) Тест на опън с Zwick 1475; c) Размери на пробното тяло (IS527-1а).

С параметри 1-9 от таблица 1 е планиран дробен факторен експеримент с резолюция IV и две факторни нива, който изисква 64 комбинации. От всяка комбинация са изработени по 3 пробни тела. За отчитане на десетия параметър са добавени още четири комбинации (по една за всяка от четирите шарки, със средно факторно ниво), като от всяка са изработени по 6 пробни тела. Така общият брой произведени и изпитани на опън пробни тела е 216, с 68 комбинации от параметри. При всеки тест е записана кривата на деформиране и са отчетени якостта на опън σ_M и модулът на еластичност *E*. Резултатите са показани на фиг. 28.



Фигура 28. Експериментални резултати за σ_M и *E*, подредени по якостта на опън σ_M .

Влиянието на шарката (параметър 10) е дадено в таблица 3 и фиг. 30. При "триъгълна" се получава най-висока якост – средно с около 3,5 МРа над другите видове. Най-малко ефективен е видът "мрежа", който има 10,68 % по-ниска якост, но почти същото тегло и време за печат като "триъгълна". Най-икономична е шарката "пчелна пита", с най-ниско тегло и време за изграждане.

(средни стойности, спрямо "триъгълна")									
IIIanva	Ортого-	Mpe-	Триъ-	Пчелна					
шарка	нална	жеста	гълна	пита					
E, MPa	1650	1800	2060	1740					
σ_M , MPa	27,0	27,5	31,0	27,9					
$\sigma_{M,}, \%$	-11,97	-10,68	0,00	-10,45					
Тегло, %	-4,79	-1,63	0,00	-10,40					
Време за изг-	2 22	0.00	0.00	5.00					
раждане, %	-3,33	0,00	0,00	-3,00					

Таблица 3. Влияние на шарката върху $E, \sigma_M,$ теглото и времето за изграждане





3

Влиянието на деветте параметъра от таблица 1 върху якостта е показано на фиг. 32. Диаметърът на дюзата, височината на слоя, процента на запълване и ориентацията на горния и долния слой влияят най-силно върху якостта. От второстепенно значение е припокриването на пълнежа, последвано от температурите на плочата и на екструдирания материал. Скоростта и множителят на диаметъра на дюзата практически не влияят върху якостта.

В дисертацията е изследвано също и влиянието на цвета на филамента (бял или черен), както и на времето на престой на филамента след разопаковане (1 ден или 30 дни) върху якостта на изградените пробни тела. Установено е, че тези два фактора оказват малко влияние, което може да се пренебрегне.



Фигура 32. Влияние на отделните параметри върху *ом.*

Чрез линейна регресия и на база на показаните резултати, статистическият софтуер генерира следното уравнение за прогнозиране якостта на опън:

 $\sigma_{M} = 34,926 - 192,2 D_{N} + 140,3 W_{E} + 0,00852 v - 45,3 h_{l} - 0,73 I + 0,242 T_{B} - 0,256 T_{E} - 1,894 O_{I} + 0,1406 O_{P} - 32,3 d_{N} W + 0,00708 d_{N} v + 235,8 d_{N} h_{l} - 0,1376 d_{N} I + 0,242 d_{N} T_{B} + 1,011 d_{N} T_{E} - 1,298 d_{N} O_{I} + 0,0516 d_{N} O_{P} - 0,00766 W_{E} V - 47 W_{E} h_{l} - 0,1704 W_{E} I - 0,134 W_{E} T_{B} - 0,442 W_{E} T_{E} + 0,797 W_{E} O_{I} - 0,1417 W_{E} O_{P} - 0,00724 v h_{1} - 0,000018 v I + 0,00001 V T_{B} - 0,000005 v T_{E} - 0,000051 v O_{I} + 0,000013 v O_{P} - 0,5006 h_{l} I - 0,017 h_{l} T_{B} + 0,458 h_{l} T_{E} + 0,001603 I T_{B} + 0,005124 I T_{E} + 0,00466 I O_{I} - 0,000993 I O_{I} - 0,00249 T_{B} T_{E} + 0,00296 T_{B} O_{I} + 0,000256 T_{B} O_{P} + 0,006 T_{E} O_{I} - 0,000378 T_{E} O_{P}.$

При решаването на това уравнение в границите, заложени в таблица 1, е получен оптималният набор от параметри на процеса FLM, даден в таблица 4. С тези параметри моделът предсказва якост на опън 52,93 ± 2,26 МРа при 95% доверителен интервал. При такива параметри бяха изработени и изпитани 3 броя пробни тела. Получената якост на опън е с 6,9% по-голяма от най-високата стойност, получена при планирания експеримент (the best of DoE). Резултатите са показани в таблица 5 и на фиг. 35.

<i>d</i> _n , mm	<i>W</i> _{<i>E</i>,} -	h_l , mm	I, %	<i>O</i> _{<i>I</i>} , %
0,5	1,1	0.3	90	35
v, mm/min	T_E , °C	T_B , °C	O_P , °	<i>P</i> #
1000	220	70	0	3

Таблица 4. Оптимален набор от параметри.

Таблица 5. Резултат от оптимизацията ($\Delta \sigma_{M, mean}$ спрямо the best of DoE)

Резултат	σ _M ^{min,} MPa	σ _{M,} ^{mid,} MPa	<i>о</i> _{М,} _{max,} MPa	σ _{M,} ^{mean,} MPa	Δσ _{Μ,} ^{mean,} %
Best of DoE	44,8	49,4	49,5	47,9	_
Оптимален набор	49,9	51,2	52,4	51,2	6,9
Прогноза с 95% довер. интервал	50,67	52,93	55,19	52,93	10,5



оптималния набор от параметри.

2.5. Свойства на изходния материал и на шприцвани пробни тела

Използваният в настоящата дисертация изходен материал е PLA (от английското polylactic acid, полимлечна киселина, полилактид) – термопластичен полиестер във формата на нишка (филамент) с диаметър 1,75 mm или 2,85 mm. Характеризира се с високи якост на опън и модул на еластичност, лесен е за преработка поради ниската си температура на встъкляване, произвежда се от възобновяеми източници и е биоразградим. По спецификация изходният материал има следните свойства:

- Якост на опън: $\sigma_M = 63$ MPa;
- Удължение до разрушаване: $\varepsilon = 4\%$;
- Коефициент на Поасон *v* = 0,36;
- Плътност: $\rho = 1,24$ g/cm³;
- Температура на встъкляване: $T_G = 58$ °C;
- Температура на топене: $T_M = 168$ °C.

Първоначално са направени по три теста на опън с Ø1,75 и Ø2,85, непосредствено след разопаковане и след 120 дена престой в работното помещение. Използвана е изпитвателна машина MFC T500, мерна дължина 150 mm и два вида захвати – метални и пластмасови (PLA). Общият брой направени тестове е 24.

Изпитателната машина и някои от получените криви на деформиране са показани на фиг. 36. Установена е средна якост на опън 49,4 MPa (при скорост на деформиране 20 mm/min) и среден модул на еластичност 2240 MPa (при скорост 1 mm/min). Времето на престой след разопаковане не влияе съществено на свойствата на материала. Диаметърът на филамента и материалът на захватите обаче влияят на поведението на материала в пластичната област, като с увеличаване на диаметъра и използване на по-меки захвати удължението до разрушаване нараства.



Фигура 36. а) Изпитвателна машина MFC T500; б) Криви на деформиране на филамент.

За да се установят свойствата на материала след формоване при висока температура, са изработени и изпитани 27 броя стандартни пробни тела (ISO 527) с шприц-машина Arbug 320 C, фиг. 37, от бял филамент Verbatim© PLA, Ø2,85 mm. Повече от 80 % от образците се разрушиха далеч от закръглението, което доказва, че формата на пробно тяло ISO 527 тип 1А е подходяща за изпитване на хомогенен полимер PLA.





При изпитване на шприцваните пробни тела с машина Zwick 1475 се получи модул на еластичност 3120 MPa, с 28% по-голям от този на изходния филамент. Тъй като при тестовете с MFC T500 не беше използван екстензометър, възникнаха съмнения за съществена грешка при отчитане на надлъжната деформация. Затова тестовете на опън на филамента бяха повторени с тестова машина MESSPHYIK[®], при мерната дължина 450 mm, с цел се намали дела на грешката от деформации в захватите – фиг. 38. Получената при този експеримент стойност на E е 2680 MPa. За да се елиминира напълно грешката от деформиране в захватите, беше добавен лазерен екстензометър и проведени нови 30 теста (по 15 с Ø1,75 и Ø2,85, захвати от PLA). При тези тестове E има средна стойност 3130 MPa (Ø1,75) и 3000 MPa (Ø2,85), т.е. колкото на шприцваните пробни тела. В заключение, установено е, че леенето под налягане не променя якостно-деформационните свойства на изходния материал.



Фигура 38. а) Изпитвателна машина MESSPHYSIK[©] с лазерен екстензометър; b) Криви на деформиране на изходния материал и на шприцвано пробно тяло.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТВАНЕ НА FLM СИСТЕМА С ИНДУСТРИАЛЕН РОБОТ

3.1. Въведение

Понастоящем на пазара не се предлага FLM система, която да притежава и пълноценно да използва множество степени на свобода. Затова е взето решение да се създаде собствена роботизирана система за адитивно производство (ARMS). С нея първоначално ще се произвеждат пробни тела, които ще се изпитват и сравняват изградените по конвенционална 2½D FLM технология. За целта ще се използват резултатите, получени и представени в глава 2.

Настоящата дисертация е част от по-голяма цел – изграждане на свързващи детайли "на място". За постигането ѝ, първо са определени изискванията към тестовата система. След това са формулирани 6 различни стратегии за изграждане на свързващи детайли. Описана е създадената роботизирана система, дадени са механизмите за контрол и управление на отделни работни параметри. Главата завършва с описание на проблемите, възникнали при въвеждане в експлоатация на роботизираната система и техните решения.

3.2.-3.3. Точност и изисквания към разработваната роботизирана система

Отделните показатели на точността и методите за тяхното определяне са стандартизирани в ISO 9283 и подробно анализирани в дисертацията. Създадената ARMS съдържа 6-осев робот KUKA KR-16-2 със следните показатели:

- Точност на положението: $\pm 0,7$ mm;
- Повтаряемост на положението: ±0,05 mm;
- Точност на траекторията: ±0,9 mm за линейни движения при 1 m/s;
- Повтаряемост на траекторията: ±0,2 mm при линейна скорост 1 m/s.

Към разработваната ARMS се поставят следните изисквания:

- Да изгражда детайли чрез процес FLM и филамент PLA;
- Да е способна да изгражда свързващи елементи "на място".

3.4. Хардуерна реализация

Новоразработената роботизирана система, отговаряща на поставените изисквания, е представена на фигури 45 и 46. Основният елемент е индустриален робот KUKA KR-16-2 със софтуер KRC4. Посредством специален преходник, изграден чрез FLM процес, към робота са монтирани нагревател и екструдер E3D-Online Ltd. Titan Aero Kit (фиг. 48). Нагревателният блок е преработен, за да използва две (вместо една) 30 W нагревателни капсули с PID-контрол.



Фигура 45. ARMS по време на работа: а) Общ вид; b) Изграждане на детайл при $\gamma = 180^{\circ}$



Фигура 46. Схема на ARMS: A1-A6 – оси на робота; 1 – печатна плоча; 2 – екструдер; 3 – преходник; 4 – радиални вентилатори с въздухопроводи; 5 – горна вилка; 6 – триточкова опора; 7 – долна вилка; 8 – макара с филамент; 9 – контролен блок.



Фигура 48. Екструдер: а) Схема на фабричен екструдер: 1 – топлинна спирачка; 2 – нагревателен блок; 3 – дюза; 4 – нагревателна капсула; 5 – термистор; b) снимка на реализирания екструдер с модифициран нагревателен блок и специален преходник.

Показаната система включва специално проектирана и изработена алуминиева стойка. Стойката позволява вертикално преместване и регулиране от ± 5 mm. Вградената в нея триточкова опора с пружини ефективно намалява вибрациите, които се получават при работа от контакта на дюзата с частично разтопения материал. Плочата е оформена така, че да позволява изграждане на пробни тела с необходимите размери във всички направления (отгоре, отдолу и отстрани). В нея са вградени 4 броя 40 W нагревателни капсули с PID-контрол, които поддържат температура 65 °C.

3.5. Софтуерна реализация

Потокът от данни в ARMS, от идеята до физическата част, е показан на фиг. 50. Първите стъпки са подобни на 2½D-технологията, до генерирането на машинния G-код. След това, понеже този код не се поддържа от управлението на робота, е необходимо G-кодът да се преведе на езика KUKA Robot Language (KRL). Необходима е и проверка за колизии. За целта е избран софтуерът RoboDK[©], който предоставя офлайн среда за симулации с роботи (ROSE).

След като RoboDK[©] генерира KRL-кода с помощта на модифициран постпроцесор (PP), той се изпраща към вътрешната памет на управлението на робота (KRC4). KRC4 управлява движенията по отделните оси, за да се изпълнят командите от KRL-кода – за процеса FLM това са предимно линейни (LIN) движения. Командите, свързани с екструдирането, се изпращат през EtherCAT Shield към микроконтролер Arduino, който управлява драйвера на стъпковия двигател на макарата с филамента и топлинните елементи на екструдера. Втори микроконтролер, който не е показан на фиг. 50, контролира температурата на печатната плоча независимо от KRL-кода.



Фигура 50. Поток от данни на роботизираната система ARMS.

В дисертацията са разгледани подробно следните аспекти на софтуерната реализация:

- Особености при превода от G-код към KRL, с акцент върху начините за постигане на желаните траектории чрез апроксимация;
- Координатни системи (общо 5 на брой), необходими на ROSE за позициониране в триизмерното пространство;
- Управление на ъглите *α*, *β* и *γ* в ROSE, за постигане на желаните резултати при използване на 6 степени на свобода.

3.6. Резултати и дискусия

С новосъздадената роботизирана система ARMS, след етап на внимателно калибриране и настройване, бяха успешно изградени разнообразни детайли и съединения – фиг. 56. Целта беше да се изпита ARMS по отношение стабилността на процеса и точността на размерите при изграждане на детайли с различна големина – фиг. 56 а) и b). Фигура 56 с) и d) показва процеса на отпечатване на свързващ детайл "на място", каквото е основното предназначение на ARMS. Тестовете преминаха успешно. Беше потвърдена функционалността на създадената система, което даде основание за по-нататъшни изследвания и разработки, свързани с влиянието на ротационните степени на свобода върху якостта, твърдостта и точността на размерите.



фигура 56. Детайли, произведени с ARMS:
а) ракетен корпус с височина 1000 mm; b) Зъбно колело с Ø115 mm;
в, г) Изграждане на свързващ детайл "на място" (изглед отгоре и отдолу).

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ НА ТЕХНОЛОГИЯТА И ПАРАМЕТРИТЕ НА ПРОЦЕСА ВЪРХУ ЯКОСТТА

4.1. Въведение

Трите основни направления на всяка структура, изградена чрез FLM процес, от значение за якостните свойства и за анизотропното поведение, са:

- по посока на нишките (strand direction, SD);
- интерфейс нишка-нишка (strand-strand, SS);
- интерфейс слой-слой (layer-layer, LL) фигури 57 и 63.

Наклонът на слоя спрямо направлението на нормалното напрежение σ се дефинира с два ъгъла: α – спрямо SD в равнината xz и α_x – спрямо SS в равнината xy. При изграждане с ARMS желаният наклон на слоя се реализира с управление на ъглите α и γ , показани на фиг. 18. В глава 4 влиянието на ротационните степени на свобода (ъгли α, β и γ) върху свойствата на изградените структури е изследвано в следните направления:

- α : SD, SS, SL, $\alpha = 20^{\circ}$, $\alpha = 45^{\circ}$, $\alpha_x = 20^{\circ} c$ дюзи Ø1 mm и Ø2 mm;
- γ: SD, SS, SL, α = 20°, α = 45°, с дюза Ø1 mm, печатната плоча се накланя на 90° и на 180° спрямо оси *x* и *y*;
- β : SD, SS, SL, $\beta = 80^{\circ}$, $\beta = 90^{\circ}$, $\beta = 100^{\circ}$ с дюза Ø1 mm, наклонът на дюзата е в равнина *xz*, спрямо направление SD.



Фигура 57. Основни направления в структура, изградена чрез процеса FLM.



Фигура 63. Вид пробно тяло според ориентацията на слоевете: SD, SS и LL.

Едновременно с α , β и γ е изследвано влиянието и на други фактори, като дебит на материала, припокриване на пълнежа, точност на траекторията. Главата завършва с получаване на оптимален набор от параметри на процеса за постигане на максимална якост на пробните тела, изградени с ARMS.

4.2.-4.5. Изследвания, свързани с геометрията на пробното тяло

Изпитването на опън е важен метод за определяне на механичните свойства и за оценка на качеството на използваната технология. Качеството на захващане и формата на пробното тяло са много важни за провеждането на успешен експеримент и за получаването на пълна крива на деформиране. Проблемите със захващането или с формата на пробното тяло обикновено водят до преждевременно разрушаване извън мерната дължина, което компрометира резултата. Формата ISO 527-2 тип 1А не е подходяща за пробни тела, произведени с FLM процес. Първо, поради геометрични ограничения, свързани с диаметъра на дюзата. Второ, защото нехомогенността и анизотропията, причинени от адитивния процес, повишават чувствителността към концентрация на напреженията и водят до разрушаване извън мерната дължина – фиг. 59.



Фигура 59. Неприемливо разрушаване на стандартни пробни тела, произведени с ARMS.

След задълбочен анализ беше постигната формата, показана на фиг. 62 – с големи радиуси на кривина и по-голяма обща дължина, но със запазена мерна дължина от 80 mm. Номиналното напречно сечение е увеличено от 10×4 mm на 12×6 mm. То може да се изгради с цял брой нишки независимо да ли се използва дюза с диаметър 1 mm или 2 mm.

Новата форма беше изследвана експериментално (30 пробни тела, показани на фиг. 64) и числено (фиг. 66). Поведението при разрушаване зависи силно от комбинацията работни параметри на процеса, но като цяло е задоволителна, поради което тази форма е използвана при всички следващи изследвания.













а) Влияние на припокриването на пълнежа върху мястото на сечението с максимална концентрация на напреженията; b) Анализ с крайни елементи.

4.6. Методики за производство и изпитване на пробни тела

Съгласно указанията, дадени в стандарти ISO 527, ISO/ASTM 52900 и 52903, са разработени две методики, описани подробно в дисертацията:

- Методика за изграждане на пробни тела със системи 2¹/₂D и ARMS;
- Методика за изпитване на пробни тела на опън.

4.7. Влияние на ориентацията на слоя (ъгъл α) върху якостта

Експериментът включва 2 вида системи (21/2D и ARMS), два размера дюзи (Ø1 mm и Ø2 mm), шест различни ориентации (фиг. 68) и три различни повторения за всяка комбинация, общо 2×2×6×3=72 броя пробни тела. Част от резултатите, пресметнати с номиналното напречно сечение, са дадени на фиг. 70.







Фигура 70. Криви на деформиране на материала на пробни тела, произведени с ARMS.



MS

В зависимост от набора параметри на процеса, се наблюдава отклонение в действителната площ на напречното сечение, което се отразява на действителната стойност на нормалните напрежения. Затова е пресметната коригирана якост на опън σ_M^* , с действителната площ – фиг. 71. При ARMS се получават по-големи отклонения отколкото при 2½D. При настройване на системата това се коригира с увеличаване припокриването на пълнежа, което увеличава якостта в направления SS и LL. В дисертацията са направени подробни изследвания и анализи на тези ефекти.

Промяната на ъгъл α позволява изграждане без поддържащи структури, което е едно от основните предимства на ARMS, а направените в тази секция изследвания дават добра представа как това се отразява на якостните свойства. Поддържащите структури при класическата 2½D технология създават повърхностни дефекти, което значително намалява σ_M^* . Като цяло, при изследванията, свързани с ъгъл α , технологията ARMS се представя по-добре от 2½D.

За по-нататъшните изследвания е използвана дюза Ø1 mm, тъй като с нея се получава над-добра повтаряемост на резултатите.

4.8. Влияние на наклона на печатната плоча (ъгъл у) върху якостта

При това изследване са използвани същите комбинации от параметри, както в предходния раздел 4.7, с изключение на $\alpha_x=20^\circ$, като дюзата е Ø1 mm. Печатната плоча се накланя на 90° спрямо оси *x* и *y*, както и на 180° (изграждане отгоре надолу). Планираните комбинации са показани на фиг. 77. Експериментът включва 5 ориентации на пробното тяло, 3 ориентации на печатната плоча (три стойности на γ), 2 системи (2½D и ARMS) и 3 екземпляра от всяка комбинация, общо 5×3×2×3=90 бр. пробни тела. Резултатите са сравнени с тези, показани на фиг. 71, където $\gamma=0^\circ$.

За разлика от ARMS, който лесно изгражда детайли при различни наклони на печатната плоча (фиг.45), използваният $2\frac{1}{2}D$ Creality© Ender 5+ FLM принтер е предназначен само за работа с хоризонтална плоча ($\gamma=0^\circ$). За да може да работи при $\gamma=90^\circ$ и $\gamma=180^\circ$, принтерът беше усъвършенстван, като чрез FLM беше допълнително изградена оригинална стойка – фиг. 76.



Фигура 76. 2½D изграждане на пробно тяло LL след завъртане на целия принтер на γ=90°: а) около ос *x* (поглед отстрани) b) около ос *y* (поглед отгоре).



Фигура 77. Пробни тела за изследване на влиянието на γ : a) 2½D; b) ARMS.

На фиг. 78 е показана получената коригирана якост на опън σ_M^* . Като цяло, σ_M^* не е чувствителна към промяната на наклона на печатната плоча γ .



Фигура 78. Якост на опън в зависимост от наклона на печатната плоча (ъгъл γ).

4.9 Влияние на дебита и припокриването на пълнежа върху якостта

Установеното отклонение в площта на напречното сечение *A*, което при LL достига +70% (фиг. 80), е намалено чрез рекалибриране на ARMS, с промяна на дебита и припокриването на пълнежа O_I . Тези два параметъра обаче влияят съществено на якостта. За да се изследва това влияние, е проведен експеримент с 2 стойности на дебита (98% и 100%) и 11 стойности на O_I (от 0% до 70%) при γ =0°. Изградени и изпитани са общо 39 бр. пробни тела SS и 6 бр. пробни тела LL. Част от получените резултати са показани на фиг. 84 и 87.

След рекалибриране на $2\frac{1}{2}$ D- и ARMS-системата, отклонението в *A* беше намалено с до 30%. Изградени и изпитани бяха нови 30 бр. пробни тела за изследване влиянието на ъгъл γ (5 комбинации × 2 системи × 3 екземпляра). Резултатите са показани на фигури 80, 82 и 83.







Фигура 80. ОтклоненияФигура 82. Криви на деформиранеФигура 83. Якост на опънпри напречното сечение.след рекалибриране (ARMS).преди и след калибриране.

Повторното калибриране и уеднаквяването на дебита и припокриването на пълнежа при ARMS и 2½D системите прави резултатите по-добре сравними. При пробните тела LL ARMS дава най-голямо отклонение в *A*: +42,74 %.

Промяната на дебита влияе съществено върху якостта. Намаление от само 2% понижава σ_M^* с над 14 MPa при SS и с около 10 MPa при LL. Припокриването на пълнежа при SS образци променя σ_M^* от 31,86 MPa при $I_O=0\%$ до 47,29 MPa при $I_O=40\%$. Увеличаването на I_O над 40% води до големи отклонения на напречното сечение, което изкривява резултатите за коригираната якост.

4.10. Влияние на наклона на дюзата (ъгъл β) върху якостта

При това изследване са използвани три ориентации (SD, SS и LL), три стойности на β (80°, 90° и 100°) и две системи (2½D и ARMS) – фиг. 89.

Произведени са по 3 екземпляра от всеки вид, т.е. $3 \times 3 \times 2 \times 3 = 27$ бр. пробни тела. Влиянието на наклона на дюзата върху процеса на екструдиране е показано на фиг. 90. При $\beta < 90^{\circ}$ стопеният материал се избутва пред дюзата, докато при $\beta > 90^{\circ}$ се влачи след нея. При 2½D технологията винаги $\beta = 90^{\circ}$.





За да се избегнат колизиите при работа на ARMS, се наложи да се проектира и изработи нов преходник между робота и екструдера, който да осигури съосност на дюзата на екструдера с фланеца на робота – фиг. 91. Новият детайл е изграден чрез FLM, от филамент с въглеродни влакна за по-голяма коравина.



Фигура 91. Преходник на екструдера: а) Първоначален дизайн; b) Нов дизайн.

За да се изолира влиянието единствено на изследвания параметър (β) и да се елиминират отклоненията в напречното сечение, първоначално се изграждат блокове с размери 300×30×6 mm, от които впоследствие се фрезоват пробните тела (фиг. 64 (с)). Използван е СNC машинен център Hedelius T8 3200.

Получената якост на опън е показана на фигури 93 и 94. Установява се, че:

- Якостта при ориентация SD не се повлиява от наклона на дюзата, тъй като зависи предимно от площта на напречното сечение;
- Якостта при ориентация SS се влияе много от β, тъй като се променя сечението на нишките и силата, с която стопилката се притиска към вече

изградения материал. При $\beta > 90^{\circ}$, стопилката упражнява по-малка сила и якостта намалява, а при $\beta < 90^{\circ}$ якостта се увеличава.

• Ефектът при ориентация LL е подобен на този при SS. При β = 80° процесът на изграждане е нестабилен и якостта е незадоволителна.

С фрезованите пробни тела могат да се оценят влиянията на кинематичната точност и на външните слоеве върху якостта. По-ниската точност на траекторията при ARMS влошава свързването на нишките и слоевете. При SS, $\beta = 90^{\circ}$ и равни други условия σ_M^* намалява от 38,59 MPa при 2½D до 20,55 MPa за ARMS. При LL стойностите са съответно 38,78 MPa и 34,3 MPa. При използване на 2½D система, наличието на еднослойна стена увеличава якостта с над 10 MPa за SS и с около 4 MPa за LL.



Фигура 93. Якост на опън в зависимост от наклона на дюзата β . Лични стойности на β (ARMS).

4.11. Влияние на отклоненията в траекторията върху якостта

Точността и повторяемостта на траекторията (Accuracy of trajectory AT* и Repeatability of trajectory RT*) са от първостепенно значение за качеството на връзките между отделните нишки и могат да причинят разслояване на структурата, когато се използват относително малки диаметри на дюзата. За да се изследва това влияние, AT* и RT* са измерени с помощта на оптична система за регистриране на премествания и деформации VIC-3D 9, работеща на принципа на сравняване на дигитални изображения (Digital Image Corelation, DIC), фиг. 99. Направена е съпоставка между точността, постигната от системите 2,5D и ARMS, и коригираната якост на опън σ_M^* на изградените с тях пробни тела – фигури 106 и 107. Установено е, че нарастването на AT* до стойност 0,2 mm намалява с 18 MPa σ_M^* при ориентация SS, с 5 MPa при ориентация LL и на практика не оказва влияние върху σ_M^* при ориентация SD.



4.13. Оптимален набор от параметри

На база проведените експерименти и натрупания опит е предложен оптимален набор от работни параметри при FLM процес с използване на ARMS – таблица 14. Той е за обща употреба и е подходящ при изработване на свързващи детайли "на място". Допълнително могат да се направят следните препоръки:

- Тъй като пробните тела с ориентация SD имат най-голяма якост и са найслабо чувствителни към измененията в други параметри на процеса, се препоръчва детайлите да се изработват с такава ориентация на нишките, че основното натоварване да е по направление на нишките (SD);
- Наклонът на дюзата трябва да е β=90°. Дори малки отклонения в този ъгъл имат негативен ефект върху якостта при ориентации SS и LL;
- Намаляването на отношението μ между височината на слоя и ширината на екструдиране увеличава якостта, за сметка на времето за изграждане;
- Най-голяма якост се постига при триъгълна шарка и при максимално запълване *I*;
- За да се намали негативното влияние на отклоненията в траекторията върху якостта, се препоръчва да се използва дюза по-голям диаметър;
- Наклонът на печатната плоча у не влияе на якостта, което позволява при използване на ARMS да се извършва изграждане при произволна стойност на у.

Ориентация спрямо товара	β, °	μ, -	I, %	О _І , %	<i>RT*</i> , mm	AT*, mm	$T_E,$ °C	$T_B,$ °C	γ, °	Шарка	$d_n,$ mm
SD, <i>α</i> =0°	90	ниско	високо	15	0,05	0,05	220	70	0180	триъгълна	≥ 1

Таблица 14. Оптимален набор от параметри при работа с ARMS.

ГЛАВА 5. ЧИСЛЕНО МОДЕЛИРАНЕ

5.1.-5.3. Особености на моделите, резултати и анализи

В главата са описани създадените числени модели за изследване на якостнодеформационното поведение на пробни тела при опън – геометрия, материални свойства, начални и гранични условия, мрежа от крайни елементи и др. Използван е софтуерният пакет ANSYS[®] Workbench[™]. Моделирани са два вида структури – плътна структура, каквато се получава при шприцване на пластмаси (фиг. 116) и FLM структура с ориентация SD (фиг. 118). Еласто-пластичното поведение на материала е моделирано посредством мултилинейно изотропно уякчаване, като са използвани собствени експериментални данни. Получените криви на деформиране при опън са сравнени с реални експериментални резултати от предходните глави (фигури 115 и 119). Постигнато е добро съвпадение между симулираните и експерименталните резултати.

Предложените модели могат успешно да се използват за симулиране на механичното поведение на FLM структури, макар че този подход има два недостатъка: много голям брой на крайните елементи заради сложната структура и необходимост в CAD-модела да се заложат геометричните неточности, които се получават при изграждане на структурата.



научно-приложни и приложни приноси

Настоящият дисертационен труд е посветен на изследване на влиянието на ротационните степени на свобода на 6-осев индустриален робот върху якостта на пробни тела, изградени чрез FLM процес. Пробните тела са изграждани с две различни системи: конвенционална 2½D система (3D-принтер) и ARMS (специално създадена роботизирана система). Получените резултати имат научно-приложен характер и могат да бъдат обобщени както следва:

- 1. Разработена и въведена в експлоатация е роботизирана система за адитивно производство (ARMS), за изграждане на свързващи детайли "на място".
- 2. Чрез управление на наклона на слоевете спрямо печатната плоча (ъгъл α), с ARMS е реализирано изграждане без поддържащи структури. Наред с технологичните и икономическите ползи, така е увеличена и якостта, тъй намаляват дефектите, дължащи се на поддържащите структури.
- 3. Изграждането с ARMS води до увеличаване на якостта напречно на нишките поради увеличено припокриване на пълнежа. Въртеливите движения на робота при постоянна скорост на екструдиране водят до намаляване скоростта на изграждане, а от там и до увеличено припокриване.
- 4. Експериментално е установено, че накланянето на дюзата (ъгъл β) намалява якостта на изградените структури. При работа с ARMS оста на дюзата трябва да се поддържа перпендикулярна на екструдираната нишка (β=90°).
- 5. Експериментално е установено, че отклоненията в траекторията на робота оказват негативно влияние върху якостта на изградените структури, тъй като намаляват контактните области между нишките и слоевете.
- 6. Предложени са оптимални набори от параметри на работния процес за двете използвани системи, с цел изграждане на структури с максимална якост.
- 7. Създадени са числени модели за изследване на якостно-деформационното поведение при опън на шприцвани и на адитивно изградени пробни тела.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- 1. **M. Schwicker**, N. Nikolov, *Fused-Layer Modeling: from idea to physical part*, "TechSys 2021", Plovdiv, Bulgaria, 27-29 May 2021, Accepted by AIP Conference Proceedings, Indexed in Scopus (SJR)
- 2. M. Schwicker, N. Nikolov, *Development of a Fused Deposition Modeling System to Build Form-Fit Joints Using an Industrial Robot*, "ICMERR 2021", Krakow, Poland, 11-13 December 2021, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2022, Vol. 11, No. 2, pp. 51-58, Indexed in Scopus (Q3)
- 3. **M. Schwicker**, N. Nikolov, *Development of Tensile Test Specimens for Fused Deposition Modeling*, "ICNME 2021", 20-22 December 2021, Materials Science Forum, 2022, Vol. 1058, pp. 175-182, Indexed in Scopus (Q4)
- 4. **M. Schwicker**, N. Nikolov, *Strength Optimization and Strength Prediction of Fused Deposition Modelled Specimens Based on Process Parameters*, Accepted February 2022 by International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research", Indexed in Scopus (Q3)

SUMMARY

EFFECTS OF THE ROTATIONAL DEGREES OF FREEDOM OF A SIX-AXIS ROBOT ON TENSILE STRENGTH OF TEST SPECIMENS PRODUCED BY FUSED-LAYER MODELING

Maurice Patrick Schwicker

Technical University of Sofia, Faculty of Transport, Department of Mechanics

The aim of the dissertation is to examine, how the additional degrees of freedom of an industrial robot and the robot kinematics affect the strength of FLM produced specimens, and to create optimized parameter-sets for the robot operation.

Chapter I includes literature review and finishes with the aim and the major tasks of the PhD-work.

Chapter II is dedicated to studies on base material and a conventional $2\frac{1}{2}D$ printer. It starts with descriptions of all important process parameters and the test bench used. Using partial factorial experimental design, 216 specimens in 68 combinations are produced and tested and the influence of ten selected parameters is examined. Optimal parameters set for the $2\frac{1}{2}D$ system is proposed. Further the stress-strain curves and mechanical properties of the base filament material and injection molded specimens are examined using over 50 additional tests.

Chapter III is devoted to the design, implementation, and usage of a FLM system with an industrial robot (ARMS). A specially created system is described and tested, which is one of the main contributions in the dissertation. The created ARMS is fully operational and capable to create form-fitted joints.

Chapter IV is entitled "Influence of technology and process parameters on strength". It starts with development of new specimens' geometry, which provides specimens breakage inside the parallel length, followed by two methodologies – for specimens manufacturing and for tensile testing. The chapter continues with experimental studies on the following influences on strength: new degrees of freedom (angles α , β , and γ), flow rate, infill overlap, accuracy and repeatability of trajectory. Over 500 specimens are produced and tested. The core result is that the created ARMS allows producing parts without support structures, by changing angle α . This gives technological and economic benefits and increases strength. The ability to tilting the nozzle (angle β) should not be used, because $\beta=90^{\circ}$ leads to maximum strength. Changing the print bed orientation (angle γ) has no effect on strength. Optimal process parameters set for building parts with maximum strength using ARMS are given in the end of the chapter.

Chapter 5 is devoted to numerical modelling of elastic-plastic deformation and tensile strength of SD and injection molded specimens using finite element method. The obtained numerical results match well with the experimental data.

The dissertation ends with a brief description of the main results, a list of references and a list of related scientific publications. On the topic of the dissertation the doctoral student is a first author in four scientific publications.



TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA FACULTY OF TRANSPORT Department of Mechanics

M. Eng. Maurice Patrick Schwicker

EFFECTS OF THE ROTATIONAL DEGREES OF FREEDOM OF A SIX-AXIS ROBOT ON TENSILE STRENGTH OF TEST SPECIMENS PRODUCED BY FUSED-LAYER MODELING

EXTENDED ABSTRACT

of a dissertation for gaining educational and scientific degree "DOCTOR"

Area: 5. Technical sciences

Professional field: 5.1. "Mechanical Engineering"

Scientific specialty: Construction mechanics and Strength of materials

Scientific supervisor: Assoc. Prof. Eng. Nikolay Nikolov, PhD

SOFIA, 2022

The dissertation work was discussed and directed for defense by the Departmental Council of the Department of Mechanics at the Faculty of Transport of TU – Sofia at a regular meeting held on 28.06.2022.

The public defense of the dissertation will take place on 04.10.2022 at 15:00 in the LIC Conference Hall at the Technical University of Sofia at an open meeting of the scientific panel, appointed by Order No. OX-5.1-66 /20.07.2022 of the Rector of TU – Sofia, composed of:

- 1. Prof. Eng. Ivan Mladenov Kralov, DSc, TU Sofia, Chair,
- 2. Prof. Eng. Georgi Dimitrov Todorov, DSc, TU–Sofia, Scientific Secretary,
- 3. Prof. Eng. Venelin Stoyanov Jivkov, DSc, retiree,
- 4. Prof. Eng. Kliment Blagoev Hadjov, DSc, UCTM
- 5. Assoc. Prof. Eng. Dimitar Petkov Karaivanov, PhD, UCTM

Reviewers:

- 1. Prof. Eng. Venelin Stoyanov Jivkov, DSc
- 2. Prof. Eng. Kliment Blagoev Hadjov, DSc

The defense materials are available to those interested in the Faculty of Transport office: TU – Sofia, Block 9, Room 9310.

The dissertant is a doctoral student in an independent form of study at the Department of Mechanics of the Faculty of Transport. The dissertation research was carried out by the author.

Author:	M. Eng. Maurice Schwiker
Title:	Effects of the rotational degrees of freedom of a six-axis robot
	on tensile strength of test specimens produced by
	Fused-Layer Modeling
Print run:	30 pieces
Printed in	Technical University of Sofia Publishing House

I. GENERAL CHARACTERISTICS OF THE DISSERTATION

Relevance of the problem

Additive manufacturing is used to produce prototypes and finished products. The Fused-Layer Modeling (FLM) extrusion method creates 2½-dimensional strands by depositing a thermoplastic material, the bonding and buildup which builds a physical part. The machines used typically have only linear drives on the X, Y and Z axes, which limits layer formation strategies, creates anisotropy and stepped surfaces.

A possible approach to improve Additive Manufacturing based on the FLM process is to use the kinematics of a six-axis robot. The additional rotational degrees of freedom of the robot make it possible to tilt the extruder nozzle relative to the substrate, allowing a fully three-dimensional approach to layer formation strategies. Eliminating the need for support structures when building parts with overhangs and reducing build time, creating conditions for increased surface quality and part strength. It opens the way for hybrid production, where parts can be built directly on existing structures, for example when creating form-fitted joints.

Aim of the dissertation, main tasks, and research methods

The aim of this thesis is to design an extrusion layer-by-layer build system with a 6-axis industrial robot, to investigate the influence of additional degrees of freedom on the properties of the produced test specimens and to obtain an optimal set of operating parameters to produce parts with maximum tensile strength.

In order to achieve this goal, the following tasks are set:

- Carry out preliminary studies with a conventional 2¹/₂-dimensional printer and establish the optimum output process parameters for Fused-Layer modeling;
- To develop an Fused-Layer modeling system incorporating a 6-axis industrial robot (ARMS), allowing direct building of forms-fitted joints "on site";
- To develop methodologies: to work with ARMS; to produce specimens of appropriate shape; to test the specimens in tension;
- Conduct experimental studies to establish the influence of process parameters using ARMS on tensile strength and propose optimal parameter sets;
- To create a finite element numerical model for predicting the tensile strength and deformational behavior of specimens built using the FLM process. To validate the model with experimental results.

Scientific novelty

A robotic system for additive manufacturing of parts using Fused-Layer modeling was designed and built. Methodologies for working with the system, and for specimens tensile testing were developed. The optimum values of the process parameters in terms of the strength and deformation properties of the obtained specimens were determined.

Practical applicability

The created robotic system, together with the developed methodologies for its operation and the proposed optimal values of the main process parameters, can be successfully used to produce parts with complex shape, as well as in hybrid production – for printing forms-fitted joints.

A wealth of information on the strength and deformation properties of the injection-molded and FLM-produced specimens, as well as of the starting material (filament), was experimentally obtained. A variety of FLM process parameter combinations were used and applied to both conventional and robotic build systems.

A numerical model for strength-deformation analyses of FLM-produced specimens was developed using the experimental data.

Approval

All experiments were performed in the laboratories of the University of Applied Sciences – Kaiserslautern, Germany, in compliance with the relevant requirements.

Publications

The main achievements and results of the dissertation have been published in 4 scientific articles. They have been reported in 2021 at the *TechSys*, *ICMERR* and *ICNME* conferences and accepted for publication in Scopus indexed journals: the AIP Conference Proceedings (SJR), the International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research (Q3, 2 issues) and the Materials Science Forum (Q4).

Structure and scope of the dissertation

The dissertation is 165 pages in length and includes an introduction, 5 chapters to address the main tasks formulated, a list of main contributions, lists of references used and list of publications on the dissertation. A total of 91 sources are cited, all in Latin. The work includes a total of 119 figures and 15 tables. The numbers of the figures and tables in the abstract correspond to those in the thesis.

II. CONTENTS OF THE THESIS

CHAPTER 1. LITERATURE REVIEW

1.1. Nature of additive manufacturing by extrusion

The term "extrusion" refers to processes that produce a soft heated thermoplastic. This material is passed through one or more nozzles and the resulting filament is deposited on a printing plate. The heat energy in the material is sufficient to melt the substrate, which forms a permanent bond with the next layer after cooling. The contours are built by moving the nozzles in the xy (2D) plane. The third dimension is not used as a continuous *z*-coordinate but serves to offset the plate as the individual layers are formed. In reality, the process has two and a half dimensions (2½D), though it is commonly referred to 3D printing. Figure 4 illustrates the basic FLM process.



Figure 4. Schematic representation of the FLM process.

The extruded material hardens on cooling due to heat exchange with the environment. The FLM process is therefore suitable for materials with a high melting point and low thermal conductivity, most commonly waxes and plastics. The addition of a second nozzle allows the construction of hybrid parts with different colors or specific mechanical properties. Many FLM systems use their second nozzle to build support structures from a different material when required.

The FLM process comes with a number of constraints and challenges. Structures that are finer than the minimum extrusion width cannot be printed in the *xy* plane. The *z*-axis resolution is limited by the layer height. Since the filaments are circular in cross section, sharp corners cannot be obtained in the printed part. Challenges are printing speed, which depends on nozzle movement speed and material flow rate;

whisker formation; distortion of the printed part; nozzle clogging and wear, anisotropy in mechanical properties, support structures, etc.

1.1.1. FLM process information flow

The information path from the idea to the printed part is shown in Fig. 6. It includes a virtual and a real part. The virtual part covers the generation and visualization of the idea in a CAD system, the conversion through a universal file format (STL), the processing with layer generation software, the obtaining of the machine G-code. The physical part involves printing with an FLM printer and removing the support material.



Figure 6. FLM process information flow.

Chapter 1 provides a detailed overview of the elements of the FLM process:

• 1.1.2. *STL file format* - nature, advantages, and disadvantages. STL is a versatile but simple mathematical method for describing complex three-dimensional details by surfaces composed of triangles;

- 1.1.3. *Machine G-code* a sequence of commands that are executed by numerically-controlled machines, including for the purpose of three-dimensional printing;
- 1.1.4. Layer generation software nature and capabilities. This is the basic software for the process. It creates the layers to be printed and the sequence of commands to be executed by the printing machine. It allows different part orientations in space, in search of a solution with minimal need for support structures Fig. 8.





1.1.5. Layer generation settings – over 100 parameters can be set programmatically, the main ones are given in Fig. 9. The values of these parameters individually and in aggregate have a major impact on the quality of the built part. Finding an optimal set of parameters requires continuous research, accumulation of practical experience, and conducting multi-factorial experiments, which are also done in this dissertation. The main settings are analyzed in detail and their influences are illustrated. For example, Fig. 10 shows the effects of some geometry and layers related settings on the specimen's structure.

1.2-1.3.2. Status of research related to the FLM process

Due to the variety of options offered by commercially available software and hardware solutions for FLM printing, standardization and optimization of the process are difficult, and research is mainly related to strength, geometric accuracy, surface quality, process stability, etc. Particular attention in the literature review is given to the feasibility of a multi-axis FLM process and the effects that additional degrees of freedom have on the quality of the produced parts. In the reviewed literature, drives with 4, 5 or (most commonly) 6 degrees of freedom are usually used, which can be achieved with the use of an industrial robot. The ability for the

nozzle to move in all directions can bring many benefits, with the elimination of support structures and reduced build time usually emphasized. The fully threedimensional approach allows uneven layers to be deposited, thereby reducing stepping effects and improving surface quality. Continuous deposition of the surface layers (with reduced step effect) allows for strengthening and stiffening of the entire structure, with a 59% increase in yield strength and 9% increase in modulus of elasticity reported in the literature. A stiffening effect is also achieved by changing the extrusion direction.



Figure 9. Settings in the layer generation software.



Figure 10. Effects of FLM process parameters (own study): (a) Nozzle diameter and extrusion width; (b) Bed height; (c) Fill; (d) Patterns: orthogonal, grid, triangular, zigzag, fast honeycomb, full honeycomb; (e) Overlapping filling.

1.3.4.-1.3.5 Geometric parameters of the robotic FLM process

Figure 18 shows the vectors that are important for the FLM process: plate normal vector *n*, layer normal vector *b* (build direction), nozzle axis *e*, gravity vector *g*. In the classical FLM process, the angle γ is equal to zero and the vectors *n*, *b* and *e* are parallel to each other and perpendicular to the print bed. Driving the nozzle with a 6-axis robot allows to realize different directions of *n*, *b*, and *e* by controlling the angles α , β and γ :

- α allows building without support structures and printing outside the volume above the print bed by changing the build direction b;
- β allows tilting the nozzle axis *e* with respect to the velocity vector *v*. In this way, the cross section of the extruded filament and the structure of the built-up specimen are affected.
- γ allows direct building on existing surfaces with arbitrary orientation in space.



Figure 18. Basic geometrical parameters of the FLM process.

The kinematic features of the robot are also under investigation. It has been shown in the literature that robots have lower acceleration than linear actuators of a conventional FLM system, which can affect the resulting structure and the strength. Furthermore, the trajectory accuracy of the industrial robot is much lower than that of a typical 2½D system. This can affect the bonding of the layers, especially at smaller nozzle diameters. It is therefore necessary to make measurements of the actual working motions and investigate their influence on the strength.

1.4. Tensile strength of structures obtained by FLM process

The publications dealing with the tensile strength of FLM and anisotropic materials, according to their basic approach, are summarized and reviewed in three groups:

- *Experimental*, partially supplemented with planned experiments, computed tomography, or microscopic imaging;
- *Modelling with numerical methods*, with subsequent verification of results;
- *Analytical*, using the classical approach where stresses are calculated by the cross-sectional area.

Classical experimental methods are commonly found in modern studies. They are suitable for verification but require careful planning and conduct of experiments. The finite element method (FEM) is used to study and predict the loading behavior of specimens produced with the FLM process, and good match with experimental results is obtained. The method requires large computational resources that depend on the mesh density and the problem-solving step. Classical Laminate Theory (CLT) is commonly used in the study of mechanical properties of orthotropic composites composed of layers of different materials. CLT can be adapted for structures built by the FLM method, which are also in layers, but this poses challenges related to the interaction between individual layers. The Unit Cell method used in computational micromechanics can also be adapted to FLM structures. For this, unit cells should be used to transfer the mechanical properties of the material from the micro to the macro level. This approach can save computational resources and allow the study of complex parts and structures, but the practical implementation is complex and requires the development of specialized software. In the classical analytical approach, the normal stress is calculated by dividing the force by the area over which it acts. If the actual cross-sectional area of the FLM structure is correctly determined, results close to experimental results are obtained.

In this thesis mainly classical experimental methods are used, partially supported by planned experiments. FEM has been used to simulate the tensile test by building a three-dimensional model of the printed discrete structure and using the experimentally obtained material properties.

1.5. Aim and objectives

The aim of this dissertation is to investigate how the additional degrees of freedom of the industrial robot (angles α , β and γ from Fig. 18) and the robot kinematics affect the strength of specimens produced by the FLM process and to propose optimal sets of operating parameters. To achieve this goal, the following tasks are formulated:

1. Perform initial studies with a basic PLA filament and a conventional 2½D printer:

- a) Check repeatability at default settings;
- b) Determination of the initial FLM process optimal parameters;
- c) Obtaining reference mechanical properties.

2. Development and commissioning of a Additive Robotic Manufacturing System (ARMS) to build forms-fitted joints.

3. Development of methodologies for FLM printer and ARMS operation as well as for tensile testing, including development of appropriate specimens' geometry.

4. Experimental research to obtain strength-optimal operating parameters sets, after establishing the effects of:

- a) Slope of the built layer angle α ;
- b) Nozzle tilt angle β ;
- c) Printing plate tilt angle γ ;
- d) Trajectory accuracy for ARMS and 21/2D system;
- e) Impact of infill overlap and flow rate.

5. Creation of a numerical finite element model to predict the tensile strengthdeformational behavior of FLM specimens and verification with the obtained experimental results.

CHAPTER 2. RESEARCH WITH A CONVENTIONAL 21/2D PRINTER

2.1.-2.4. FLM process parameters optimization to maximize the strength of built structures

Prior to the development of ARMS, it is necessary to accumulate a solid information and experience of the general parameters of the FLM process. Therefore, a planned experiment has been conducted to find the optimal parameters set of the $2\frac{1}{2}D$ FLM process which gives the maximum strength of the printed structures.

The layer generation software used, Simplify3D[®], allows adjustment of about 100 parameters. When planning the experiment, a minimal, but sufficient number of specimens should be produced and tested. For this purpose, those parameters that affect the strength the most should be determined and their lower (L) and upper (H) limits defined. The results of this selection are shown in Table 1.

№	Parameter	Designation	Lower limit (L)	Upper limit (H)
1	Nozzle diameter	d_N	0,3 mm	0,5 mm
2	Diameter multiplier	W_E	$0,9 imes d_N$	$1,1 imes d_N$
3	Layer height	h_l	0,1 mm	0,3 mm
4	Infill density	Ι	50%	90%
5	Infill overlap	O_I	15%	35%
6	Print speed	v	1000 mm/min	3000 mm/min
7	Extrusion temperature	T_E	200 °C	220 °C
8	Print bed temperature	T_B	70 °C	90 °C
9	Top and bottom layer orientation	O_P	0°	90°
10	Infill pattern	<i>P</i> #	1 – Rectangular; 2 3 – Triangular; 4 -	– Grid; - Full Honeycomb

Table 1. FLM process parameters included in the planned experiment.

The specimens were built with an RF2000 printer, Fig. 27. The starting material is Verbatim[©] PLA filament, Ø2,85 mm. Tensile testing was carried out with a Zwick 1475 machine, at room temperature, with a strain rate of 1 mm/min in the elastic region and 20 mm/min in the plastic region. The specimen conforms to ISO 527-1A. Only the data from specimens ruptured in the measured length were used. The Minitab statistical software[®] was used to plan the experiment.



Figure 27. Experimental setup: a) Renkforce RF 2000 and computer with Simplify3D® software; b) Tensile test with Zwick 1475; c) Dimensions of the specimen (IS527-1a).

With parameters 1-9 from Table 1, a fractional factorial experiment with resolution IV and two factor levels was planned, requiring 64 combinations. From each combination, 3 specimens were built. To account for the tenth parameter, four more combinations (one for each of the four patterns, with an average factor level) were added, and 6 specimens were built from each combination. Thus, the total number of tensile test specimens produced and tested was 216, with 68 combinations of parameters. For each test, the stress-strain curve was recorded, and the tensile strength σ_M and the modulus of elasticity *E* were obtained. The results are shown in Fig. 28.



Figure 28. Experimental results for σ_M and *E* arranged by tensile strength σ_M .

The pattern influence (parameter 10) is given in Table 3 and Fig. 30. The "triangular" type produces the highest strength – on average about 3,5 MPa above the other types. The least effective type is the "grid", which has 10,68% lower strength but almost the same weight and printing time as "triangular". The "honeycomb" pattern is the most economical, with the lowest weight and build time.

(average values, relative to "triangular")									
Pattern	Rectan gular	Grid	Trian gular	Honey comb					
<i>E</i> , MPa	1650	1800	2060	1740					
σ_M , MPa	27,0	27,5	31,0	27,9					
$\sigma_M, \%$	-11,97	-10,68	0,00	-10,45					
Weight, %	-4,79	-1,63	0,00	-10,40					
Build time, %	-3,33	0,00	0,00	-5,00					

Table 3. Pattern influence on

E, σ_M , weight and build time



different patterns.

The influence of the nine parameters in Table 1 on the strength is shown in Fig. 32. Nozzle diameter, layer height, infill density, and orientation of the top and bottom layers affect the strength the most. Of secondary importance is the infill overlap, followed by the temperatures of the plate and the extruding material. Nozzle speed and diameter multiplier have almost no effect on strength.

The dissertation also includes research on the influence of the filament color (white or black) as well as the filament unpacked time (1 day or 30 days) on the strength of the built specimens. These two factors were found to have little influence that could be ignored.



By linear regression and based on the results shown, the statistical software generates the following equation to predict the tensile strength:

 $\sigma_{M} = 34,926 - 192,2 D_{N} + 140,3 W_{E} + 0,00852 v - 45,3 h_{l} - 0,73 I + 0,242 T_{B} - 0,256 T_{E} - 1,894 O_{I} + 0,1406 O_{P} - 32,3 d_{N} W + 0,00708 d_{N} v + 235,8 d_{N} h_{l} - 0,1376 d_{N} I + 0,242 d_{N} T_{B} + 1,011 d_{N} T_{E} - 1,298 d_{N} O_{I} + 0,0516 d_{N} O_{P} - 0,00766 W_{E} V - 47 W_{E} h_{l} - 0,1704 W_{E} I - 0,134 W_{E} T_{B} - 0,442 W_{E} T_{E} + 0,797 W_{E} O_{I} - 0,1417 W_{E} O_{P} - 0,00724 v h_{l} - 0,00018 v I + 0,00001 V T_{B} - 0,000005 v T_{E} - 0,000051 v O_{I} + 0,000013 v O_{P} - 0,5006 h_{l} I - 0,017 h_{l} T_{B} + 0,458 h_{l} T_{E} + 0,001603 I T_{B} + 0,005124 I T_{E} + 0,00466 I O_{I} - 0,000993 I O_{I} - 0,00249 T_{B} T_{E} + 0,00296 T_{B} O_{I} + 0,000256 T_{B} O_{P} + 0,006 T_{E} O_{I} - 0,000378 T_{E} O_{P}.$

By solving this equation within the boundaries set in Table 1, the optimal set of FLM process parameters given in Table 4 is obtained. With these parameters, the model predicts a tensile strength of $52,93 \pm 2,26$ MPa with a 95% confidence interval. With such parameters, 3 specimens were bult and tested. The resulting tensile strength was 6,9% greater than the highest value obtained in the planned experiment (the best of DoE). The results are shown in Table 5 and Fig. 35.

1	117	1	τ. 0/	O = 0
a_n , mm	WE, -	n_l , mm	1, %	$O_I, \%$
0,5	1,1	0.3	90	35
v, mm/min	T_E , °C	T_B , °C	O_P , °	<i>P</i> #
1000	220	70	0	3

 Table 4. Optimal parameters set.

Table 5: Optimization result ($\Delta \sigma M_{, mean}$ versus the best of DoE).

Result	$\sigma_{M min}$, , MPa	σM, ^{mid,} MPa	σM, ^{max,} MPa	σM, ^{mean,} MPa	ΔσΜ, ^{mean,} %
Best of DoE	44,8	49,4	49,5	47,9	-
Optimal set	49,9	51,2	52,4	51,2	6,9
Forecast with 95% confidence interval	50,67	52,93	55,19	52,93	10,5



2.5 Properties of starting material and injection molded specimens

The starting material used in this thesis is PLA (from polylactic acid, polylactide) – a thermoplastic polyester in the form of a filament with a diameter of 1,75 mm or 2,85 mm. It is characterized by high tensile strength and modulus, is easy to process due to its low glass transition temperature, is produced from renewable sources and is biodegradable. According to the specification, the starting material has the following properties:

- Tensile strength: $\sigma_M = 63$ MPa;
- Elongation at break: $\varepsilon = 4\%$;
- Poisson's ratio v = 0,36;
- Density: $\rho = 1,24 \text{ g/cm}^3$;
- Glass transition temperature: $T_G = 58$ °C;
- Melting point: $T_M = 168$ °C.

Initially, three tensile tests with \emptyset 1,75 and \emptyset 2,85 were performed immediately after unpacking and after 120 days in the workroom. An MFC T500 testing machine was used, measuring 150 mm in length and two types of grips – metal and plastic (PLA). The total number of tests performed was 24.

The testing machine and some of the resulting stress-strain curves are shown in Fig. 36. An average tensile strength of 49,4 MPa (at a strain rate of 20 mm/min) and an average modulus of elasticity of 2240 MPa (at 1 mm/min) were found. The time after unpacking does not significantly affect the material properties. However, the diameter of the filament and the material of the grips affect the behavior of the material in the plastic region – the elongation to failure increasing with the diameter and the use of softer grips.



Figure 36. a) MFC T500 testing machine; b) Filament stress-strain curves.

To establish the material properties after high temperature molding, 27 standard specimens (ISO 527) were produced with an Arbug 320 C injection molding machine, Fig. 37, from white Verbatim© PLA filament, Ø2,85 mm, and tested. More than 80 % of the specimens broke away from the roundness, proving that the ISO 527 type 1A specimen shape is suitable for testing homogeneous PLA polymer.



Figure 37. Injection moulded specimens: (a) machine; (b) before testing; (c) after testing.

Testing the injection molded specimens with a Zwick 1475 machine gave a modulus of elasticity of 3120 MPa, 28% greater than that of the starting filament. As no extensometer was used in the MFC T500 tests, a significant error in the longitudinal strain reading was suspected. Therefore, the tensile tests of the filament were repeated with a MESSPHYIK[®] testing machine, at the measured length of 450 mm, to reduce the proportion of error from deformation in the grips – Fig. 38. The value of *E* obtained in this experiment was 2680 MPa. To eliminate the deformation error in the grips, a laser extensometer was added, and 30 new tests were conducted (15 both with \emptyset 1,75 and \emptyset 2,85, PLA grips). In these tests, *E* had an average value of 3130 MPa (\emptyset 1,75) and 3000 MPa (\emptyset 2,85), i.e., the same as the injection molded specimens. In conclusion, it was found that injection molding does not change the strength-deformation properties of the starting material.



Figure 38. a) MESSPHYSIK[©] testing machine with laser extensometer; b) Stress-strain curves of the starting material and the injection molded specimen.

CHAPTER 3. DEVELOPMENT OF FLM SYSTEM WITH INDUSTRIAL ROBOT

3.1. Introduction

There is currently no FLM system available on the market that has and fully exploits multiple degrees of freedom. Therefore, the decision was made to create a proprietary robotic additive manufacturing system (ARMS). This system will initially be used to produce specimens, with aim to test and compare them with those built using conventional 2½D FLM technology. The results obtained and presented in Chapter 2 will be used for this purpose.

This dissertation is part of a larger goal – building forms-fitted joints. To achieve it, the requirements for the test system are first defined. Then, 6 different strategies for building forms-fitted joints are formulated. The designed robotic system is described and the mechanisms for control and management of individual operating parameters are given. The chapter concludes with a description of the problems encountered in commissioning the robotic system and their solutions.

3.2.-3.3. Accuracy and requirements for the developed robotic system

The individual accuracy metrics and their determination methods are standardized in ISO 9283 and analyzed in detail in the thesis. The established ARMS contains a 6-axis KUKA KR-16-2 robot with the following metrics:

- Position accuracy: ±0,7 mm;
- Position repeatability: ±0,05 mm;
- Trajectory accuracy: ± 0.9 mm for linear movements at 1 m/s;
- Trajectory repeatability: $\pm 0,2$ mm at 1 m/s linear velocity.

The following requirements are set for the ARMS under development:

- To build parts using FLM process and PLA filament;
- Be able to build forms-fitted joins.

3.4. Hardware implementation

The newly developed robotic system meets the given requirements and is presented in Figures 45 and 46. The main element is a KUKA KR-16-2 industrial robot with KRC4 software. A heater and an extruder E3D-Online Ltd. Titan Aero Kit (Fig. 48) were mounted to the robot by means of a special adapter built by FLM process. The heater unit was redesigned to use two (instead of one) 30 W PID-controlled heater capsules.



Figure 45. ARMS in operation: a) General view; b) Specimen build at $\gamma = 180^{\circ}$



Figure 46. ARMS scheme: A1-A6 – robot axes; 1 – print bed; 2 – extruder; 3 – adapter; 4 – radial fans with air ducts; 5 – upper fork; 6 – three-point support; 7 – lower fork; 8 – spool with filament; 9 – control unit.



Figure 48. Extruder: a) Factory extruder scheme: 1 – thermal brake; 2 – heating block; 3 – nozzle; 4 – heating capsule; 5 – thermistor; b) photo of the realized extruder with modified heating block and special adapter.

The system shown includes a specially designed and fabricated aluminum stand. The stand allows vertical movement and adjustment of ± 5 mm. The built-in three-point support with springs effectively reduces the vibrations produced by the nozzle contact with the partially melted material. The print bed is shaped to allow the required dimensions specimens building in all directions (top, bottom and side). It incorporates four 40 W PID-controlled heating capsules that maintain a temperature of 65 °C.

3.5 Software implementation

The data flow in ARMS, from the idea to the physical part, is shown in Fig. 50. The first steps are similar to the 2½D-technology, up to the generation of the machine G-code. Then, because this code is not supported by the robot control, it is necessary to translate the G-code into the KUKA Robot Language (KRL). A collision check is also required. For this purpose, the software RoboDK[©], which provides an offline robot simulation environment (ROSE), was chosen.

After RoboDK[©] generates the KRL code using a modified postprocessor (PP), it is sent to the robot's internal control memory (KRC4). KRC4 controls the movements along the individual axes to execute the commands from the KRL-code – for the FLM process these are mostly linear (LIN) movements. The commands related to extrusion are sent via the EtherCAT Shield to an Arduino microcontroller, which controls the stepper motor driver on the filament spool and the extruder's thermal elements. A second microcontroller, not shown in Fig. 50, controls the print bed temperature independently of the KRL code.



Figure 50. Data flow of the ARMS robotic system.

The following aspects of the software implementation are discussed in detail in this dissertation:

- Features of translation from G-code to KRL, with emphasis on how to achieve desired trajectories by approximation;
- Coordinate systems (5 in total) required by ROSE for positioning in threedimensional space;
- Control the angles α, β and γ in ROSE to achieve the desired results using 6 degrees of freedom.

3.6. Results and discussion

A variety of parts and joints were successfully built with the newly developed ARMS robotic system after a careful calibration and set-up stage – Fig. 56. The aim was to test the ARMS in terms of process stability and dimensional accuracy when building parts of different sizes – Fig. 56 a) and b). Figure 56 c) and d) shows the process of printing forms-fitted joints, which is the main purpose of ARMS. The tests passed successfully. The functionality of the designed system was confirmed, which provided the basis for further research and development related to the influence of rotational degrees of freedom on strength, stiffness, and dimensional accuracy.



(b) (c) (
 Figure 56. Parts manufactured with ARMS:
 (a) Rocket housing with a height of 1000 mm; (b) Gear with Ø115 mm;
 c, d) Construction of a form-fitted joint (top and bottom view).

CHAPTER 4. INFLUENCE OF TECHNOLOGY AND PROCESS PARAMETERS ON STRENGTH

4.1. Introduction

The three main directions of any structure built by FLM process, relevant to the strength properties and to the anisotropic behavior, are:

- by strand direction (SD);
- strand-strand (SS) interface;
- layer-layer (LL) interface Figures 57 and 63.

The inclination of the layer with respect to the normal stress direction σ is defined by two angles: α with respect to SD in the *xz* plane and α_x with respect to SS in the *xy* plane. When building with ARMS, the desired layer inclination is realized by controlling the angles α and γ shown in Fig. 18. In Chapter 4, the influence of rotational degrees of freedom (angles α , β and γ) on the properties of the built structures is investigated in the following directions:

- α : SD, SS, SL, $\alpha = 20^{\circ}$, $\alpha = 45^{\circ}$, $\alpha_x = 20^{\circ}$ with nozzles Ø1 mm and Ø2 mm;
- γ : SD, SS, SL, $\alpha = 20^{\circ}$, $\alpha = 45^{\circ}$ with nozzle Ø1 mm, the printing plate is tilted 90° and 180° relative to x and y axes;
- β : SD, SS, SL, $\beta = 80^{\circ}$, $\beta = 90^{\circ}$, $\beta = 100^{\circ}$ with nozzle Ø1 mm, the nozzle tilt is in the *xz* plane, relative to the SD direction.







Figure 63. Specimen type according to the layers orientation: SD, SS and LL.

Along with α , β , and γ , the influence of other factors such as material flow rate, infill overlap, and trajectory accuracy was also investigated. The chapter concludes with the finding of an optimal set of process parameters to maximize the strength of the specimens built with ARMS.

4.2.-4.5 Studies related to the geometry of the specimen

Tensile testing is an important method for determining the mechanical properties and assessing the quality of the technology used. The quality of the grip and the shape of the specimen are very important to conduct a successful experiment and to obtain a complete stress-strain curve. Problems with either the grip or the shape of the specimen usually result in premature failure beyond the measured length, which compromises the result. The ISO 527-2 Type 1A form is not suitable for specimens produced with the FLM process. First, due to geometric constraints related to the nozzle diameter. Second, because the inhomogeneity and anisotropy caused by the additive process increase the sensitivity to stress concentration and lead to failure beyond the measured length – Fig. 59.



Figure 59. Unacceptable failure of standard specimens produced with ARMS.

After a thorough analysis, the shape shown in Fig. 62 was achieved, with large radii of curvature and greater overall length, but with a retained gauge length of 80 mm. The nominal cross section was increased from 10×4 mm to 12×6 mm. It can be constructed with a whole number of threads whether a 1 mm or 2 mm diameter nozzle is used.

The new shape was investigated experimentally (30 specimens shown in Fig. 64) and numerically (Fig. 66). The fracture behavior depended strongly on the combination of process operating parameters, but was generally satisfactory, which is why this shape was used in all subsequent studies.



Figure 62. Modified specimen shape, compared to the standard ISO 527-1A form.



Figure 64. Fracture place of specimens produced with Ø1 mm nozzle: (a) With one wall, (b) Built without walls, with infill only, (c) With milled contour.



Figure 66. Stress concentration: (a) Influence of infill overlap on the location of the section with maximum stress concentration; (b) Finite element analysis.

4.6. Methodologies for the production and testing of specimens

Following the guidelines given in standards ISO 527, ISO/ASTM 52900 and 52903, two methodologies have been developed and are described in detail in this thesis:

- Methodology for building specimens with 2¹/₂D and ARMS systems; •
- Methodology for tensile testing of specimens built. •

4.7. Effect of layer orientation (angle α) on strength

The experiment included 2 types of systems (2¹/₂D and ARMS), two nozzle sizes (Ø1 mm and Ø2 mm), six different orientations (Fig. 68) and three different repetitions for each combination, for a total of $2 \times 2 \times 6 \times 3 = 72$ specimens. Some of the results, calculated with the nominal cross section, are given in Fig. 70.







of specimens produced with ARMS.

Depending on the process parameters set, a deviation in the actual cross-sectional area is observed, which affects the actual value of the normal stresses. Therefore, the corrected tensile strength σ_M^* , with the actual area is calculated – Fig. 71. Larger deviations are obtained with ARMS than with 2½D. When tuning the system, this is corrected by increasing the infill overlap, which increases the strength in the SS and LL directions. Detailed investigations and analyses of these effects are presented in this dissertation.

Changing the angle α allows building without support structures, which is one of the main advantages of ARMS, and the research done in this section gives a good idea of how this affects the strength properties. Supporting structures in classical 2¹/₂D technology create surface defects, which significantly reduces σ_M^* . In general, in the studies related to the angle α , the ARMS technology performs better than 2¹/₂D.

A Ø1 mm nozzle was used for further investigations as it produced the best results repeatability.

4.8. Effect of print bed inclination (angle γ) on strength

In this study, the same parameter combinations were used as in the previous section 4.7, except $\alpha_x = 20^\circ$, with a nozzle Ø1 mm. The printing plate is tilted 90° with respect to the *x* and *y* axes, and 180° (top-down construction). The planned combinations are shown in Fig. 77. The experiment includes 5 orientations of the printed specimens, 3 orientations of the print bed (three values of γ), 2 systems (2½D and ARMS) and 3 copies of each combination, in total 5×3×2×3=90 specimens. The results are compared with those shown in Fig. 71, where $\gamma=0^\circ$.

In contrast to ARMS, which easily builds parts at different inclinations of the printing bed (Fig. 45), the 2½D Creality© Ender 5+ FLM printer used is designed to work only with a horizontal plate (γ =0°). To be able to work at γ =90° and γ =180°, the printer was upgraded by additionally building an original stand via FLM – Fig. 76.



Figure 76. $2\frac{1}{2}D$ building of LL specimen after rotating the whole printer by $\gamma=90^{\circ}$: a) about *x*-axis (side view) b) about *y*-axis (top view).



Figure 77. Specimens for studying the influence of γ : a) $2\frac{1}{2}$ D; b) ARMS.

Fig. 78 shows the resulting corrected tensile strength σ_M^* . In general, σ_M^* is not sensitive to the change of the print bed inclination γ .



Figure 78. Tensile strength versus tilt of the print bed (angle γ).

4.9 Flow rate and infill overlap influences on strength

The observed deviation in the cross-sectional area *A*, which reached +70% in LL (Fig. 80), was reduced by recalibrating the ARMS, with a change in the flow rate and the infill overlap O_I . These two parameters significantly affect the strength. To investigate this influence, an experiment with 2 flow rates (98% and 100%) and 11 O_I values (from 0% to 70%) at γ =0°. Overall, 39 pcs of SS and 6 pcs of LL specimens were built. Some of the results obtained are shown in Figures 84 and 87.

After $2\frac{1}{2}$ D- and ARMS-system recalibration, the deviation in *A* was reduced by up to 30%. A new set of 30 specimens were built and tested to investigate the influence of γ angle (5 combinations × 2 systems × 3 specimens). The results are shown in Figures 80, 82 and 83.



The recalibration and alignment of the flow rate and infill overlap for ARMS and $2\frac{1}{2}D$ systems makes the results more comparable. For the LL specimens, ARMS gave the largest deviation in *A*: +42,74%.

Changing the flow rate significantly affects the strength. A decrease of only 2% lowers σ_M^* by over 14 MPa for SS and by about 10 MPa for LL. The infill overlap in SS specimens changes σ_M^* from 31,86 MPa at $I_O = 0\%$ to 47,29 MPa at $I_O = 40\%$. Increasing I_O above 40% leads to large cross-sectional deviations, which distorts the results for the corrected strength.

4.10. Effect of nozzle tilt (angle β) on strength

Three orientations (SD, SS and LL), three β values (80°, 90° and 100°) and two systems (2½D and ARMS) were used in this study – Fig. 89. Three specimens of

each type were produced, i.e. $3 \times 3 \times 2 \times 3 = 27$ specimens. The effect of nozzle tilt on the extrusion process is shown in Fig. 90. At $\beta < 90^{\circ}$ the molten material is pushed in front of the nozzle, while at $\beta > 90^{\circ}$ it is dragged behind it. In 2½D technology, $\beta = 90^{\circ}$.







To avoid collisions when operating the ARMS, it was necessary to design and produce a new adapter between the robot and the extruder to ensure alignment of the extruder nozzle with the robot flange - Fig. 91. The new part was built by FLM, from carbon fiber filament for greater rigidity.



Figure 91. Extruder adapter: a) Original design; b) New design.

To isolate the influence of the parameter under study only (β) and to eliminate crosssectional variations, blocks of 300×30×6 mm are initially built from which the specimens are subsequently milled (Fig. 64(c)). A Hedelius T8 3200 CNC machining center was used.

The resulting tensile strength is shown in Figures 93 and 94. It is found that:

- The strength at orientation SD is not affected by the nozzle tilt, as it depends mainly on the cross-sectional area;
- The strength at SS orientation is greatly affected by β, as the cross section of the filaments and the force with which the melt is pressed against the already

built material changes. At $\beta > 90^{\circ}$, the melt exerts less force and the strength decreases, while at $\beta < 90^{\circ}$ the strength increases.

• The effect in LL orientation is similar to that in SS. At $\beta = 80^{\circ}$ the building process is unstable, and the strength is insufficient.

With the milled specimens the effects of kinematic accuracy and outer layers on strength can be evaluated. The lower trajectory accuracy in ARMS degrades the bonding of the threads and layers. With SS, $\beta = 90^{\circ}$, and other conditions equal, σ_M^* decreases from 38,59 MPa for 2½D to 20,55 MPa for ARMS. For LL, the values are 38,78 MPa and 34,3 MPa, respectively. When using a 2½D system, the presence of a single-layer wall increases the strength by more than 10 MPa for SS and by about 4 MPa for LL.



4.11. Effect of trajectory deviations on strength

Accuracy of trajectory AT* and Repeatability of trajectory RT* are paramount to the quality of the connections between individual strands and can cause delamination of the structure when relatively small nozzle diameters are used. To investigate this influence, AT* and RT* were measured using a VIC-3D 9 optical displacement and strain recording system operating on the principle of Digital Image Correlation (DIC), Fig. 99. A comparison is made between the accuracy achieved by the 2,5D and ARMS systems and the corrected tensile strength σ_M^* of the specimens built with them, Figures 106 and 107. It was found that increasing AT* to a value of 0,2 mm reduced σ_M^* by 18 MPa in SS orientation, by 5 MPa in LL orientation, and had virtually no effect on σ_M^* in SD orientation.



4.13. Optimal parameters set

Based on the experiments conducted and the experience gained, an optimal set of operating parameters is proposed for the FLM process using ARMS – Table 14. It is for general use and is suitable for building forms-fitted joints. Additionally, the following recommendations can be made:

- Since specimens with SD orientation have the highest strength and are least sensitive to other process parameters changes, it is recommended that the parts to be built with the orientation of the threads such that the main load is in the direction of the threads (SD);
- The nozzle tilt must be β =90°. Even small deviations in this angle have a negative effect on the strength in SS and LL orientations;
- Reducing the ratio μ between the layer height and extrusion width increases the strength, at the expense of build time;
- The highest strength is achieved in a triangular pattern and at maximum infill *I*;
- To reduce the negative influence of trajectory deviations on strength, it is recommended to use a larger nozzle diameter;
- The inclination of the print bed γ does not affect the strength, which allows building to be performed at any value of γ when using ARMS.

Orientation towards the load	$\beta,$	μ, -	I, %	О _І , %	<i>RT*</i> , mm	AT*, mm	$T_E,$ °C	$T_B,$ °C	γ, °	Grid	$d_n,$ mm
SD, $\alpha = 0^{\circ}$	90	Low	High	15	0,05	0,05	220	70	0180	Triangular	≥ 1

Table 14. Optimal set of parameters when working with ARMS.

CHAPTER 5. NUMERICAL MODELLING

5.1.-5.3. Model features, results, and analyses

The chapter describes the numerical models developed to investigate the tensile strength and deformation behavior of specimens - geometry, material properties, initial and boundary conditions, finite element mesh, etc. The software package ANSYS[®] WorkbenchTM was used. Two types of structures were modeled, a dense structure, such as that produced by plastic injection molding (Fig. 116), and an FLM structure with SD orientation (Fig. 118). The elasto-plastic behavior of the material was modelled by means of multilinear isotropic hardening using own experimental data. The resulting tensile stress-strain curves are compared with real experimental results from the previous chapters (Figs. 115 and 119). A good agreement between the simulated and experimental results was achieved.

The proposed models can be successfully used to simulate the mechanical behavior of FLM structures, although this approach has two disadvantages: a very large number of finite elements due to the complex structure and the need to include in the CAD model the geometric uncertainties that arise when building the structure.



SCIENTIFIC AND APPLIED CONTRIBUTIONS

This dissertation is devoted to the study of the influence of rotational degrees of freedom of a 6-axis industrial robot on the strength of specimens built by FLM process. The specimens were built with two different systems: a conventional 2½D system (3D-printer) and ARMS (a specially built robotic system). The results obtained are of scientific and applied nature and can be summarized as follows:

- 1. A robotic additive manufacturing system (ARMS) has been developed and put into operation to build forms-fitted joins.
- 2. By controlling the inclination of the layers with respect to the print bed (angle α), a build without support structures is realized with ARMS. Along with the technological and economical benefits, the strength is thus increased as defects due to the support structures are reduced.
- 3. Building with ARMS results in an increase in strength across the strands due to increased infill overlap. The rotational movements of the robot at constant extrusion speed led to a decrease in build speed and hence increased overlap.
- 4. It has been found experimentally that tilting of the nozzle (angle β) reduces the strength of the built structures. When working with ARMS, the nozzle axis should be kept perpendicular to the extruded filament (β =90°).
- 5. It has been found experimentally that deviations in the robot trajectory negatively affect the strength of the built structures as they reduce the contact areas between the strands and layers.
- 6. Optimal sets of workflow parameters are proposed for the two systems used to build structures with maximum strength.
- 7. Numerical models have been developed to investigate the tensile strength and deformation behavior of injection molded and additively built specimens.

LIST OF THE DISSERTATION-RELATED PUBLICATIONS

- 1. **M. Schwicker**, N. Nikolov, *Fused-Layer Modeling: from idea to physical part*, "TechSys 2021", Plovdiv, Bulgaria, 27-29 May 2021, Accepted by AIP Conference Proceedings, Indexed in Scopus (SJR)
- M. Schwicker, N. Nikolov, Development of a Fused Deposition Modeling System to Build Form-Fit Joints Using an Industrial Robot, "ICMERR 2021", Krakow, Poland, 11-13 December 2021, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2022, Vol. 11, No. 2, pp. 51-58, Indexed in Scopus (Q3)
- 3. **M. Schwicker**, N. Nikolov, *Development of Tensile Test Specimens for Fused Deposition Modeling*, "ICNME 2021", 20-22 December 2021, Materials Science Forum, 2022, Vol. 1058, pp. 175-182, Indexed in Scopus (Q4)
- **4. M. Schwicker**, N. Nikolov, *Strength Optimization and Strength Prediction of Fused Deposition Modelled Specimens Based on Process Parameters*, Accepted February 2022 by International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research", Vol. 11, No. 7, pp. 527-534, Indexed in Scopus (Q3)

SUMMARY

EFFECTS OF THE ROTATIONAL DEGREES OF FREEDOM OF A SIX-AXIS ROBOT ON TENSILE STRENGTH OF TEST SPECIMENS PRODUCED BY FUSED-LAYER MODELING

Maurice Patrick Schwicker

Technical University of Sofia, Faculty of Transport, Department of Mechanics

The aim of the dissertation is to examine, how the additional degrees of freedom of an industrial robot and the robot kinematics affect the strength of FLM produced specimens, and to create optimized parameter-sets for the robot operation.

Chapter I includes literature review and finishes with the aim and the major tasks of the PhD-work.

Chapter II is dedicated to studies on base material and a conventional $2\frac{1}{2}D$ printer. It starts with descriptions of all important process parameters and the test bench used. Using partial factorial experimental design, 216 specimens in 68 combinations are produced and tested and the influence of ten selected parameters is examined. Optimal parameters set for the $2\frac{1}{2}D$ system is proposed. Further the stress-strain curves and mechanical properties of the base filament material and injection molded specimens are examined using over 50 additional tests.

Chapter III is devoted to the design, implementation, and usage of a FLM system with an industrial robot (ARMS). A specially created system is described and tested, which is one of the main contributions in the dissertation. The created ARMS is fully operational and capable to create form-fitted joints.

Chapter IV is entitled "Influence of technology and process parameters on strength". It starts with development of new specimens' geometry, which provides specimens breakage inside the parallel length, followed by two methodologies – for specimens manufacturing and for tensile testing. The chapter continues with experimental studies on the following influences on strength: new degrees of freedom (angles α , β , and γ), flow rate, infill overlap, accuracy and repeatability of trajectory. Over 500 specimens are produced and tested. The core result is that the created ARMS allows producing parts without support structures, by changing angle α . This gives technological and economic benefits and increases strength. The ability to tilting the nozzle (angle β) should not be used, because $\beta=90^{\circ}$ leads to maximum strength. Changing the print bed orientation (angle γ) has no effect on strength. Optimal process parameters set for building parts with maximum strength using ARMS are given in the end of the chapter.

Chapter 5 is devoted to numerical modelling of elastic-plastic deformation and tensile strength of SD and injection molded specimens using finite element method. The obtained numerical results match well with the experimental data.

The dissertation ends with a brief description of the main results, a list of references and a list of related scientific publications. On the topic of the dissertation the doctoral student is a first author in four scientific publications.