ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ФАКУЛТЕТ ПО ИНДУСТРИАЛНИ ТЕХНОЛОГИИ
Катедра “Технология на машиностроенето
и металорежещи машини”

Маг. инж. Фатлуме Жуаяни

Експериментално изследване на математично моделиране и оптимизация на INCONEL 718 при струговане чрез ЦПУ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

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

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1 „Машинно инженерство“

Научна специалност: „Автоматизация на машиностроенето и системи за автоматизирано проектиране“

Научни ръководители: проф. дн инж. Георги Димитров Тодоров
доц. д-р инж. Константин Христов Камберов

СОФИЯ
2023г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Технология на машиностроенето и металорежещи машини“ към „Машинно - технологичен факултет“ на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 26.06.2023.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 05.10.2023 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет - София на открито заседание на научното жури, определено със заповед на Ректора на ТУ-София в състав:

проф. дн инж. Иво Кръстев Малаков

доц. д-р инж. Явор Петров Софронов

проф. дн инж. Венелин Стоянов Живков, чл. кор. на БАН

доц. д-р инж. Нина Янкова Пенкова

проф. д-р инж. Димитър Неделчев Карастоянов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Машинно - технологичен факултет на ТУ-София, блок №3, кабинет № 3230.

Дисертантът е редовен докторант към катедра “Технология на машиностроенето и металорежещи машини” на „Машинно - технологичен факултет“. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Изследванията, свързани с експерименталната работа по дисертацията, са проведени в “SAALSS”, Prizren, Kosovo.

Автор: маг. инж. Фатлуме Жуаяни

Заглавие: Експериментално изследване на математично моделиране и оптимизация на INCONEL 718 при струговане чрез ЦПУ

Тираж: 30 броя

БЛАГОДАРНОСТИ:

Автора изразява специални благодарности на:

Проф. дн Георги Тодоров и доц. д-р Константин Камберов, моите ръководители и ръководители, които ми дадоха възможност да работя в областта на обработката на сплави Inconel 718, постоянното ми насърчаване и ползотворни дискусии за изработването на дипломната работа.

И накрая, бих искала да изкажа сърдечни благодарности на всички членове на моето семейство, особено на моя съпруг Артан Халили за неговата безкрайна подкрепа и насърчение, както и на моя любящ син Теон, за тяхното търпение и разбиране.

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Супер сплавта Inconel 718 е най-съвременен технически материал, широко ползван в производството поради изключителната си устойчивост на корозия, изключителна издръжливост и висока граница на провлачане при високи температури. Тази сплав обикновено се използва в конструкцията на реактивни двигатели, ядрени реактори и турбинни двигатели. Тя има редица отличителни качества, включително по-ниска топлопроводимост, добра якост и превъзходни механични свойства, но е много труден материал за обработка поради отделяната висока топлина при рязане, ниско качество на повърхността, силно износване на инструмента, което води до кратък живот и ниска производителност. Процесите на рязане, както обикновено, се разглеждат по отношение на параметри като сили и мощност на рязане, температура на рязане, мазане, качество на повърхността, износване и живот на инструмента. Това проучване представя един аналитичен преглед по отношение на грапавостта на повърхността, износването на инструмента и експлоатационните характеристики на живота на инструмента във връзка с основните производствени параметри на процесите на обработка.

Научна актуалност

От самото начало процесите на обработка, които се използват в промишлеността, са изправени пред предизвикателството да намерят основна технология за създаване на инженерна основа за определяне на подходящите параметри на обработка, за да се постигне висока предсказуемост и производителност по време на процеса в практиката. Тези предизвикателства се преодоляват с изследване и разработване на емпирична методология, научна (чрез предикция) методология и компютърно-базирана технология за оценка на икономическата ефективност. Повечето изследователи използват основно емпиричен анализ на данни, базиран на регресионна техника, която е мощен инструмент за моделиране и анализ на реални процеси, чието естество и поведение не могат да бъдат обяснени с помощта на теоретичен подход. Много проучвания показват, че успехът на регресионния анализ зависи от избора на подходящата форма на математически модели и че експоненциалната форма осигурява най-подходящото и ефективно приближение на експерименталните данни. Методологията за реакция на повърхността (RSM) използва главно метода на статистическата регресия, тъй като е практичен, икономичен и сравнително лесен за използване. Той анализира статистически експериментални данни, планирани да достигнат до валидни и обективни заключения.

Научно дисциплинирана система, известна като метода на Тагучи, се използва за оценка и прилагане в практика по отношение на стоки, процедури, ресурси, инструменти и съоръжения. Чрез анализиране на основните фактори, влияещи върху процеса и оптимизиране на технологията или дизайна, за да осигурят най-добрите резултати, тези подобрения се стремят да подобрят желаните качества, като същевременно минимизират количеството грешки.

Практическа приложимост

Изследването на поведението при износване на режещите инструменти традиционно разчита на обширни експериментални процедури, които изискват време и пари. От проучванията, получени в дисертацията, определянето на времето за употреба на продукт се оценява въз основа на общия брой натоварвания чрез екстраполация на кривите консумация-време, което значително намалява тези разходи. Линейните математически модели, разработени в изследването, позволяват анализ на резултатите, включително Ra, VB и TL. Те позволяват моделиране и оптимизиране на параматър поотделно или едновременно, числено или графично, и са подходящи за използване както в серийни, така и в масови производства.

Изследователска работа и апробация

Дисертационното изследване е проведено в "SAALS Industry" Призрен и в лабораторията на Факултета по машинно инженерство на Университета в Прищина

Представяне на дисертацията

Дисертационният труд е докладван в катедра „Технология на производството и металорежещи машини”, ФИТ, ТУ-София.

Публикуване на резултатите по дисертационния труд

Съществените резултати от дисертационния труд са приети в 3 доклада, реферирани в SCOPUS и Web of Science.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Въведение

1.1 Цели на изследването

Основната цел на дисертационния труд е моделиране и разработване на прогнозни математически модели, които свързват грапавостта на повърхността, износването на инструмента и живота на инструмента с три параметъра на рязане в процеса на струговане: скорост на рязане (v), подаване (f) и дълбочина на рязане (д). Тези модели ползват линейна регресия от първи ред на грапавостта на повърхността, износването на инструмента и живота на инструмента, които най-добре отговарят на установените критерии, и се планира да бъдат разработени с помощта на методологията на повърхността на реакция (RSM) и анализ на дисперсията (ANOVA). Вторичната цел е да се оптимизират параметрите на обработка, които ще доведат до акуратна оценка на обработка по време на струговане на сплави Inconel 718 с WC-Co вложки с покритие при сухи условия. Третата цел е графично оптимизиране на линейни регресионни модели, което позволява визуален избор на оптималните условия на обработка според определен критерий.

1.2 Обхват и фокус на изследването

Това изследване обхваща обработваемостта на Inconel 718, който се счита за труден за рязане материал, не само поради неговите механични свойства, но и поради неговата лоша топлопроводимост, която може да доведе до преждевременно износване на инструментите и лошо качество на крайния продукт. В тази връзка е от голямо значение да се оптимизират параметрите на обработка, като така се подобрят параметрите на процеса по отношение на качеството и цената на продукта. Изследването е фокусирано върху разработването на подходящи математически модели по систематичен, научен и надежден начин, които интегрират експериментални, аналитични и числени знания в областта на планирането на производствения процес и оптимизиране на характеристиките на реакция на процеса като грапавост на повърхността, износване на инструмента и живот на инструмента. Тези модели предоставят достатъчно технологични данни, за да осигурят ефективното използване на режещите инструменти и машини. Използването на компютърно подпомогнато производство (CAM) в процеса на обработка чрез използването на CNC и DNC машинни обработки е насочено към създаването на надеждни системи за обработка на данни, за да се осигури оптимална производителност на металорежещите машини.

1.3 Предизвикателства

Въпреки значителния напредък на традиционните технологии и развитието на режещите инструменти, машинната обработка на Inconel 718 се счита за голямо предизвикателство поради присъщите характеристики на тези базирани на Ni супер сплави, обработката на които води до голямо износване на инструмента и съответно кратък живот на инструмента. Следователно целта на изследването е изборът на подходящи режещи инструменти и параметрите на обработка като скорост на рязане, скорост на подаване и дълбочина на рязане. Тези параметри играят важна роля за ефективното използване на инструментите и по този начин значително влияят върху общите производствени разходи.

1.4 Методология на изследването

В това проучване ще бъде разработен систематичен изследователски план, който ще предостави данните и резултатите, необходими за тестване на хипотезата. За получаването на тази информация е необходимо да се извърши експериментална работа в лабораторни условия, където е необходимо да се произведат данни, които ще бъдат подходящи за тестване на определени характеристики и по този начин да се получи основна входна информация за последваща обработка и анализ и изготвяне на изводи.

Изследваният материал Inconel 718 обикновено се използва за реактивни двигатели и газови турбини. В експерименталните изследвания е използван методът Taguchi Design of Experiments (DOE) с измерване, обработка и систематизиране на резултатите. Регресионният анализ на резултатите води до прогнозни емпирични математически модели, които описват зависимостите на избраните изходни характеристики от параметрите на обработка. В процеса на оптимизация е използван устойчив модел на Taguchi, който осигурява най-добрата комбинация от параметри на рязане, които могат да доведат до оптимални резултати при обработка.

Дипломната работа е разделена на седем глави.

Глава 1 изследва съществуващия опит в машинната обработка на Inconel 718 заедно с описание на целите на изследването, предмета и методологията на изследването.

Глава 2 предоставя преглед на предишни изследвания и теоретични съображения в литературата, включително кинематика и фактори, влияещи върху процеса на струговане, теоретични (геометрични) модели на грапавост на повърхността, износване на инструмента и живот на инструмента, както и техники за моделиране и оптимизиране в процесите на струговане.

Глава 3 предлага общ преглед на параметричните оптимизационни методи (DOE) и задълбочено разглеждане на приложимостта на метода Taguchi в експерименталната работа.

Глава 4 разработва методологията за струговане на сплав Inconel 718, както и методите за изпитване, използвани за измерване на грапавостта на повърхността, износването на инструмента и живота на инструмента.

Глава 5 изследва възможностите за обработка и анализ на експериментални данни, разработване на прогнозни математически модели, статистически анализ и оптимизиране на обработваемостта чрез избор на най-добрата комбинация от параметри на режима.

Глава 6 описва графичната оптимизация и оценка на линейните регресионни модели от първи ред чрез 2D-контурни графики и 3D-повърхностни графики.

Глава 7 съдържа заключенията от дисертацията, научен принос, научни/приложни, приложни приноси, както и предложение за бъдещи изследвания по темата.

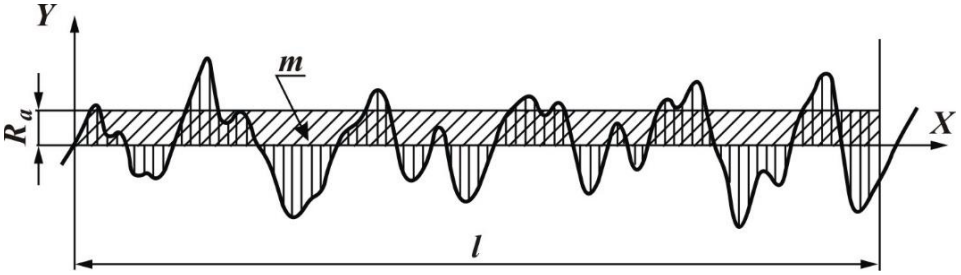
2 ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

2.1 Обобщение

Тази глава предоставя определения и информация относно планираните изследвания по дисертационния труд. Целта на главата е да се направи преглед на научната литература и методологичните принципи, отнасящи се до темите и проблемите, обсъждани в това изследване, и след това да разработи теоретична рамка за предложеното изследване. Концепцията, данните и информацията се събират от различни източници, за да се разбере концепцията и знанията или данните, полезни за проекта.

2.3 Грапавост на обработваната повърхнина

Геометрията на обработвания детайл и микрогеометрията на обработената повърхност съставляват качеството на обработената повърхност. Геометрията на детайла се определя от точността на измерванията, формата и взаимното разположение на две или повече повърхности на детайла. Микрогеометрията на обработената повърхност се определя от грапавостта на обработената повърхност. Грапавостта на повърхността се отнася до поредица от микроскопични геометрични характеристики на малки вдлъбнатини и върхове с различно разстояние и височина, които обикновено се поставят по недетерминистичен начин върху обработена повърхност. Диаграма на повърхностната обработка, Фигура 2.5 показва параметрите на грапавостта на повърхността Ra, където Ra се определя като средната вариация на профила на грапавостта от централната линия (m).



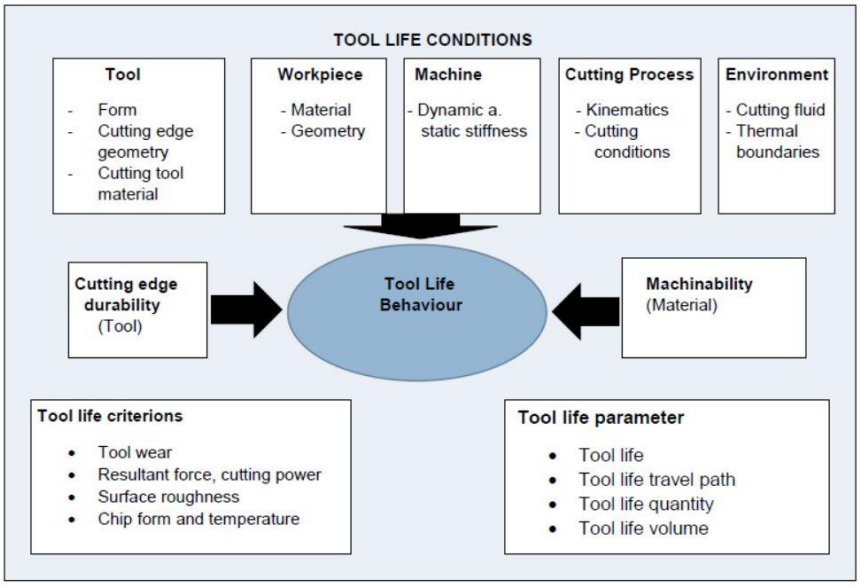
Фигура 2.5 Аритметично осреднена грапавост, Ra - диаграма

Както се вижда на Фигура 2.5, съгласно JIS B 0601 [18] (1994), стойността на Ra е по-ниска от действителната височина на вариациите на грапавостта, поради това осредняване, получено от (Уравнение 2.6). Приблизителната стойност на средното аритметично отклонение на Ra профила е:

$$R_a \approx \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i| \qquad (2.7)$$

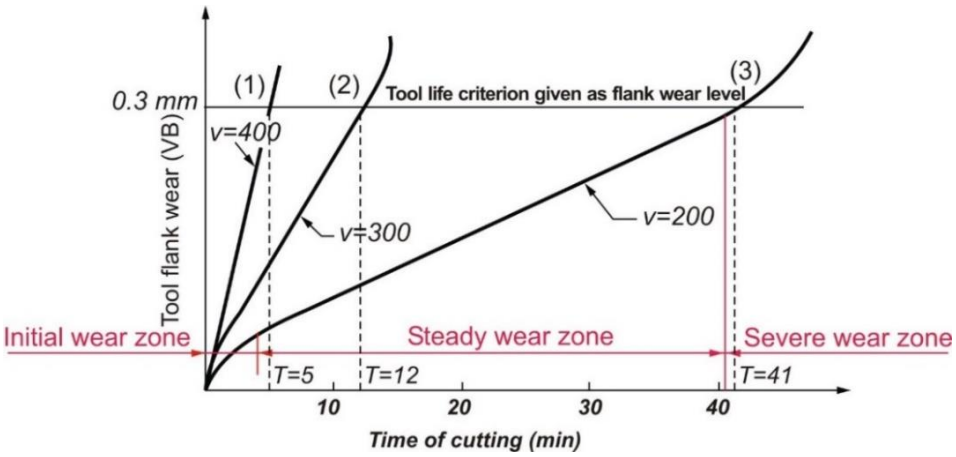
2.4 Модели за определяна на износването и дълготрайността на инструмента

Способността за прогнозиране и моделиране на износването на инструмента и очаквания живот на инструмента при рязане на метал е от голямо значение за осигуряване на здрави, предвидими и стабилни системи за обработка. Производителите на инструменти използват модели за живот на инструмента, за да помогнат на крайните потребители с оптимални данни за рязане, публикувани в онлайн каталози или онлайн уеб приложения. В зависимост от нуждите на потребителя на инструмента, производственият процес може да бъде оптимизиран или за максимална производителност, или за постигане на най-ниски производствени разходи. Поведение на живота на инструмента, според Clocke F. [9] (2011) е способността на работеща двойка (инструмент и детайл) да издържат на определен процес на рязане. Това се влияе от издръжливостта на режещия ръб на инструмента, обработваемостта на детайла и от условията на живот на инструмента, фиг. (2.7).



Фигура 2.7 Влияние на дълготрайността на инструмента, Clocke F. [9] (2011)

Прогнозираните стойности на скоростта и живота на инструмента са показани на Фигура 2.8 при критерий за дълготрайност на инструмента от 0,3 mm странично износване,. Необходими допълнителни изследвания, за да се направи уравнението за живота на инструмента практически полезно в широка област на приложение. Kronenberg M. [37] (1927) оказва най-голямо влияние върху това изследване.



Фигура 2.8 Влияние на скоростта - v върху износването- VB при три различни скорости [36]

Добре известното уравнение на Тейлър, дефинирано около 1900 г., както и неговите по-късни трансформации описват връзките между живота на инструмента и параметрите на обработка и включват няколко константи за различни комбинации от инструменти и

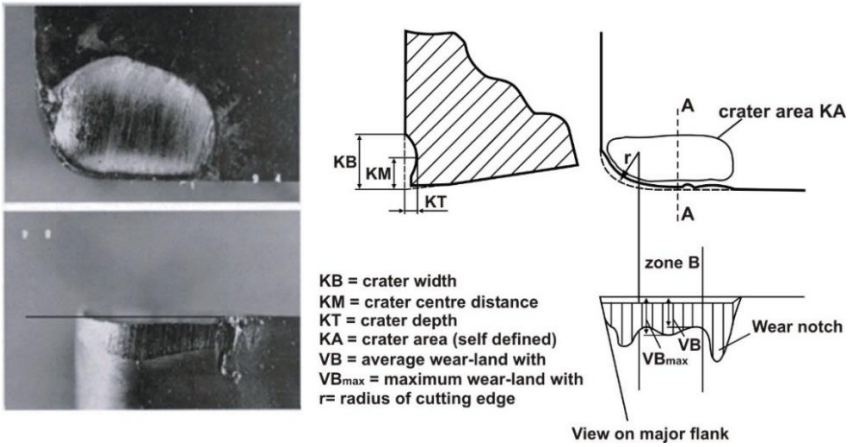
материали на детайла.

$$v \cdot T^m = C_T \quad (2.12)$$

където; v - скорост на рязане (m/min), TL - живот на инструмента (min), m - експонента в зависимост от работния материал, материала на инструмента, геометрията на инструмента и флуида за рязане. CT - константа, представляваща скоростта на рязане, която води до 1 min инструмент живот. Sheng J. [39] (2015) в своето проучване счита, че износването на режещия инструмент се случва отпред (износване на кратери) и отзад (износване на фланга) в контакт със стружки и детайли. В повечето случаи те се появяват едновременно и взаимодействат помежду си, според Waluyo et. ал. [40] 2020 г., Фиг. (2.9).

2.6 Математическо моделиране на обработваемостта

Целта на използваните методи е да се получат математически модели на процеса на обработка, т.е. да се получат функции за обработваемост. Това са математически модели, чрез които се описва взаимозависимостта на входните и изходните параметри на процеса на обработка и представлява приближение на действителната форма на функцията на процеса. Математическите модели на рязане на метал трябва да могат да предложат следната информация, според Трент и Райт [72] (2000): 1) Прогноза за живота на инструмента, TL=TL(Xi), 2) Прогноза за качеството на обработената повърхност R=R(Xi). 3) Прогноза за управление на стружките, C=C(Xi), 4) Прогноза за натоварванията върху инструмента F=F ((Xi), детайла и приспособленията, 5) Прогноза за точността на обработваните компоненти.



Фигура 2.9 Схематично представяне на износен режещ инструмент

2.6.1 Математически модели

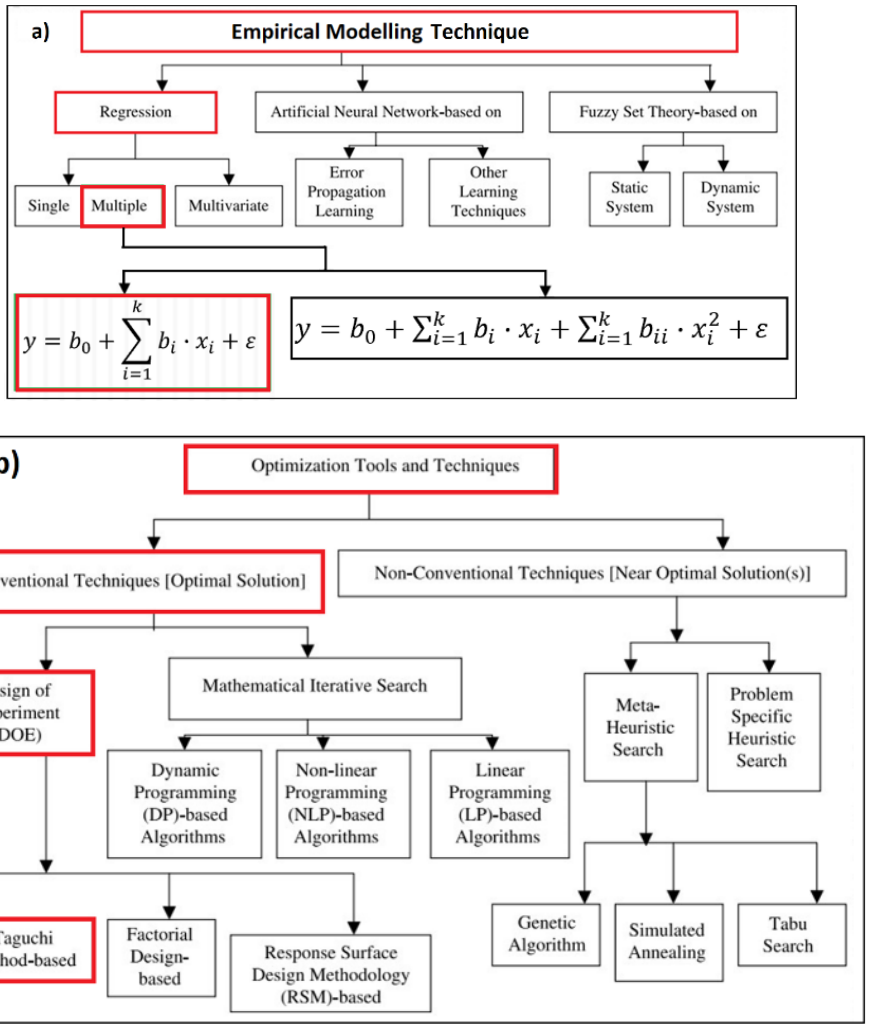
Моделите с линейна регресия са най-основните и следователно често използвани, като чрез използването на правилните трансформации на нелинейни модели, и те се свеждат до този модел. Полиномното уравнение е най-често използваният от линейните модели. Всяка степен на полиномна функция може да се използва като емпиричен математически модел. Според Sarabia и Ortiz [76] (2006), по-голямата част от експерименталните изследвания, използващи процеси на рязане като математически модели, изпълняват модели от първа степен, както следва:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i \cdot x_i + \varepsilon \quad (2.21)$$

Този модел е с линейна регресия с p=k+1 коефициенти и k независими променливи.

2.7 Подход при моделиране и оптимизация

Стратегиите за моделиране и оптимизиране в процесите на рязане на метал са подробно разгледани в публикацията на Mukherjee и Ray [83] (2006) с акцент върху (a) техники за моделиране и (b) техники за оптимизация, включително стандартни и неконвенционални (еволюционни) техники за оптимизация, както е показано в Фигура 2.11. Това проучване също така изясни, че техниките за моделиране и оптимизация са използвани в последните проучвания поради трудността при определяне на най-добрите параметри на обработка с помощта на математически модел.



Фигура 2.11 Класификация на техниките за моделиране (а) и оптимизация (б) в процеса на рязане на метал

2.8 Изводи

- От направеният литературен обзор е изготвена концепция и са определени целите на това изследване и тезите на тази докторска студия.
- Освен това, този преглед предостави достатъчно научна информация за определяне на избора на теоретична и експериментална изследователска методология, статистически методи за анализ и потвърждение на резултатите, методология на моделиране и оптимизиране на функциите за обработваемост, избор на техники за измерване, подходяща обработка, тип и качество на режещи инструменти и др., които са разгледани подробно в следващите глави.

2.9 Мотивация

Въпреки значителния напредък в технологиите за режещи инструменти, обработката на Inconel 718 все още се смята за голямо предизвикателство. Въз основа на изброените по-горе предизвикателства, това изследване беше мотивирано от необходимостта да се допринесе за изследването на обработваемостта на супер сплавта Inconel 718, за да се получат прогнозни математически модели и да се определят оптималните нива на параметрите на обработка, за да се дадат най-добри резултати за характеристиките на реакцията, т.е. грапавост на повърхността, износване на инструмента и живот на инструмента.

2.10 Цел на дисертационния труд

Целта на това изследване е по систематичен, научен и надежден начин да се разработят прогнозни емпирични математически модели, които интегрират експериментални, числени и аналитични знания в областта на планирането и оптимизирането на производствения процес.

Освен това изследването ще позволи формирането на база от знания, която с инсталирането на подходящи сензори е необходима за получаване на интелигентна система за обработка.

НАУЧНОИЗСЛЕДОВАТЕЛСКИ ЗАДАЧИ

За постигане на целта на дисертационния труд се поставят следните основни задачи:

- Провеждане на експериментални тестове в процеса на сухо струговане с помощта на ортогоналната решетка Taguchi.
- Извършване на статистически анализи с помощта на методологии за съотношение сигнал/шум (S/N) и анализ на дисперсията (ANOVA).
- Изследване на влиянието на параметрите на рязане като скорост на рязане, скорост на подаване и дълбочина на рязане върху отговорите на обработката.
- Анализиране на грапавостта на повърхността чрез измерване на средната грапавост на повърхността (Ra).
- Оценка на влошаването на износването на страната на инструмента (VB).
- Тестване на издръжливостта на инструмента (TL) чрез измерване на критичната стойност на износване на страните на инструмента (VB).
- Провеждане на потвърждаващи експериментални тестове оптимални резултати.

3. МЕТОД НА ТАГУЧИ ЧРЕЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН ДИЗАЙН

3.1 Преглед на Глава 3

В тази глава ще бъдат представени дефинициите и основните принципи на контрола на качеството, като планиране, провеждане и анализ на експеримент като цяло, докато методът на Тагучи ще бъде разгледан подробно. Основната цел на дизайна на експериментите (DOE) е да се установи оптимална производителност на процеса чрез определяне на оптималните нива на входните променливи на процеса.

3.4 Експериментален дизайн по метода на Тагучи

Методът на Тагучи за проектиране на експерименти е прост статистически инструмент, включващ система от ортогонални масиви, която позволява максимален брой основни ефекти да бъдат оценени по безпристрастен начин с минимален брой експериментални опити. Той е приложен за прогнозиране на значителния принос на дизайна на променливите и оптималната комбинация от всяка променлива чрез провеждане на експерименти в реално време. Експериментите се провеждат по начин, който определя обхвата на променливостта, произтичаща от промяната на контролирани фактори и неконтролирани фактори (шум), от Roy R. [93] (2010).

3.4.2 Експеримент тип Robust-Design

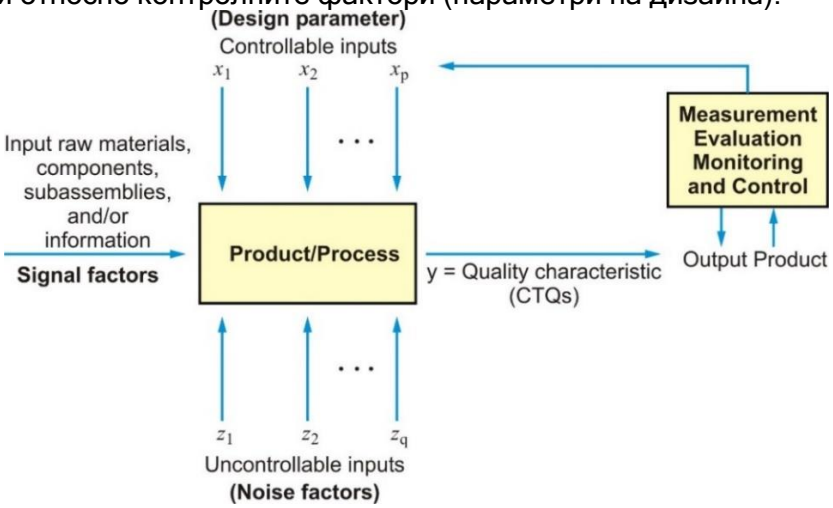
Според Phadke M. [99] 2012, методът на Тагучи, известен също като Robust-Design, е инженерен процес за повишаване на производителността по време на научноизследователска и развойна дейност, така че висококачествени стоки да могат да бъдат създадени бързо и на евтина цена.

Подходът на Тагучи за качествено инженерство взема предвид всички фази на разработването на продукта или процеса, но контролът на параметрите е от решаващо значение за получаване на високо качество и ниска цена. Оптималните нива на параметрите (елементите) на процеса се избират чрез проектиране на параметри, така че влиянието на неконтролируеми фактори да има възможно най-малко въздействие върху производителността на системата.

Пет основни инструмента съставляват стратегията за устойчивост, според Phadke M. [99] (2012).

1. P-диаграмата се използва за категоризиране на променливите на продукта в елементи на шум, контрол, сигнал (вход) и отговор (изход), както е показано на фигура 3.1.
2. Идеалната форма на връзката сигнал-отговор, както се съдържа в концепцията за проектиране за осигуряване на безупречна работа на системата от високо ниво, се определя математически с помощта на идеалната функция.
3. За да се изчисли размера на загубите, които потребителят понася в резултат на отклонение от желаната производителност, се използва квадратичната функция на загуба, известна също като функция на загуба на качество.

4. Чрез лабораторни тестове съотношението сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio) се използва за прогнозиране на качеството на полето.
5. С ограничен брой тестове се използват ортогонални масиви за получаване на надеждни данни относно контролните фактори (параметри на дизайна).



Фигура 3.1 P-диаграма на продукт или процес, от Montgomery D. [130] (2009)

Тагучи се застъпва за изследване на осреднения отговор за всеки цикъл във вътрешния масив, както и за изследване на вариациите, използвайки съотношение сигнал-шум (STN), което е внимателно подбрано.

- Основен отговор:

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \quad (3.2)$$

- Стандартно отклонение:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (3.3)$$

Освен това използването на съотношението сигнал/шум (STN) като статистика за измерване на производителността е една от многото критики към подхода на Тагучи. Докладите на STN бяха подложени на критики, защото понякога дават фалшиви резултати. Въпреки че техниката на Тагучи е по-малко популярна от класическия експериментален дизайн, тя предлага на практичния инженер полезно място, от което да започне, когато иска да подобри качеството. Основната причина за това е, че първият е фокусиран най-вече върху качествените инженерни фактори, докато вторият е фокусиран предимно върху статистическите аспекти. Ползата от подхода на Тагучи е, че той включва статистически техники в солидна инженерна процедура.

Според Kamal et al. [103] (2012), има три често срещани форми на съотношения сигнал/шум (STN), които представляват интерес за оптимизиране на статични проблеми:

- Колкото по-малко, толкова по-добре (за да направите отговора на системата възможно най-малък):

$$SN_s = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \quad (3.4)$$

- Номинално най-доброто (за намаляване на променливостта около целта):

$$SN_T = 10\log\left(\frac{\bar{y}^2}{S^2}\right) \quad (3.5)$$

- Колкото по-голямо, толкова по-добре (за да направите отговора на системата възможно най-голям):

$$SN_L = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (3.6)$$

Идеалните нива на фактора са тези, които максимизират изискваното съотношение сигнал/шум (STN) след анализ на съотношението сигнал/шум (STN), за да се установят предпочитаните стойности на параметъра. След като всички съотношения на STN са изчислени за всеки цикъл на експеримент, Тагучи препоръча графичен подход за анализ на данните. При графичния подход съотношенията на STN и средните отговори се нанасят

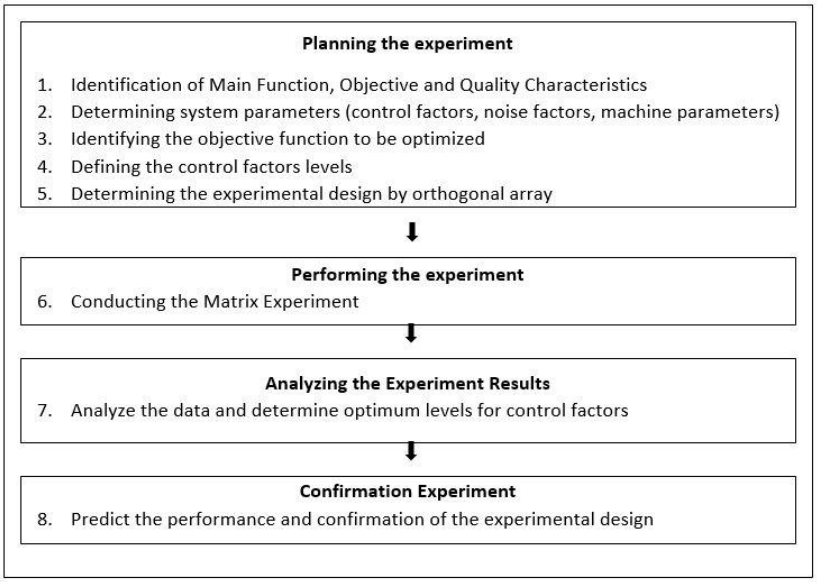
за всеки фактор спрямо всяко от неговите нива. След това графиките се изследват, за да се „избере победителят“, т.е. да се избере факторното ниво, което (i) най-добре максимизира SN и (ii) довежда средното до целта (или максимизира или минимизира средното, в зависимост от случая).

3.4.3 Подход на Тагучи към експериментален дизайн

Robust design означава намиране на оптимални настройки на контролните фактори, за да се направи продукт или процес нечувствителен към шумови фактори. Стъпките, които трябва да се следват, за да се постигне такъв дизайн на Тагучи, са изброени на Фигура 3.2. според Phadke M. [104] (1989) & Tapan B. [105] (1993). Според стъпките, включени в метода на Тагучи, трябва да се проведат серия от експерименти. По-долу е описан казусът на докторската дисертация за оптимизиране на параметрите на процеса на рязане на сплавта Inconel 718 на CNC струг. Процедурата е дадена по-долу:

Стъпка 1. Идентифициране на основна функция, цел и качествени характеристики

- Основна функция: Обработка на сплави Inconel 718 в CNC струг
- Цел и резултати: Определяне на най-добрите настройки на параметрите на процеса за оптимизиране на реакциите на процеса.
- Качествени характеристики: Директно измерване на отговора за грапавостта на повърхността на настоящото изследване, износването на инструмента и живота на инструмента.



Фигура 3.2 Метод на Taguchi при процесна оптимизация

Таблица 3.1: Контролни фактори и тяхното ниво

Фактори	Скорост на рязане (v)	Скорост на подаване (f)	Дълбочина на рязане (d)
Ниво 1	100	0.071	0.2
Ниво 2	120	0.092	0.4
Ниво 3	140	0.125	0.6

Стъпка 2. Определяне на параметрите на системата (контролни фактори, шумови фактори, параметри на машината)

- Контролни фактори: скорост на рязане, скорост на подаване и дълбочина на рязане.
- Шумови фактори: вибрации, температурни промени, умения на оператора, състояние на машината и инструмента, промени в материала).

Стъпка 3. Идентифициране на целевата функция за оптимизиране

Целта на даден процес може да бъде минимум, номинал или максимум. В този случай е избрано: Целева функция: Колкото по-малък е, толкова по-добър е STN коефициентът за тази функция (Формула 3.4), за грапавост на повърхността и износване на инструмента. Целева функция: Колкото по-голямо е, толкова по-добро е съотношението STN за тази функция (Формула 3.6), за живот на инструмента.

Стъпка 4. Определяне на нивата на контролните фактори

Въз основа на проучената литература за обработваемостта на сплав Inconel 718 и използваните вложки от карбидни режещи инструменти CCMT09T308N-SU клас AC5005S, покрити с PVD ултра многослоен тънък слой AlTiSiN, трите параметъра на обработка (контролни фактори), разгледани в това изследване, са: скорост на рязане, скорост на подаване и дълбочина на рязане. Всички те бяха зададени на три различни нива (вижте Таблица 3.1).

Стъпка 5. Определяне на експерименталния план чрез ортогонален масив

Развитието на ортогоналната решетка се приписва на сър Р. А. Фишър. Първоначалните му опити за използване на ортогонални масиви са направени за да се справи с експерименталната грешка. Оттогава, както е посочено от Рой Р. [93] (2010), Тагучи е модифицирал ортогоналния масив, за да оцени не само ефекта на изследван фактор върху средния резултат, но и да определи дисперсията от средния резултат. Ортогонален масив е набор от числа с колони, които са успоредни една на друга, което означава, че всички подредени двойки числа се появяват във всяка двойка колони еднакъв брой пъти както на най-ниското, така и на най-високото ниво.

Стъпка 5.1 Проектиране на матричен експеримент на ортогонални масиви

Стандартна таблица на ортогонален масив на Тагучи е показана на (Фигура 3.2), която се използва за изследване на цялото параметрично пространство с ограничен брой експерименти. Преди някой да се опита да избере ортогонален масив (OA) за провеждане на експерименти за оптимизация на дизайна, трябва първо да идентифицира ключовите фактори, които трябва да бъдат проучени в процеса, броя на нивата, които са възможни за всеки фактор, две взаимодействия между факторите и специални трудности в текущите експерименти трябва да бъдат изследвани. Ортогоналните масиви са специален стандартен експериментален дизайн, който изисква малък брой експериментални опити, за да се установи основният ефект на фактора върху изхода.

Таблица 3.3 Експериментално матрично оформление чрез ортогонален масив L9

Експ. №	Скорост на рязане (m/min)	Подаване (mm/rev)	Дълбочина на рязане (mm)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

За избор на ортогонален масив трябва да бъде фиксиран минималният брой експерименти (тестове), които трябва да бъдат проведени, който е даден от: Raj T. [107] (2011).

$$N_{Taguchi} = 1 + NV\ (NL-1) \qquad (3.7)$$

където; $N_{Taguchi}$ - брой експерименти, които трябва да се проведат, NV - брой променливи (фактори), NL - брой нива, номер „1“ - При преброяване на общите степени на свобода (DF), изследователят присвоява „1“ DF на общия среден отговор в изследването. Това започва да брои DF като 1., според Тарап Р. [105] (1993). В този случай на дипломно изследване за сухо струговане на сплави Inconel 718 са избрани три променливи на три нива (Таблица 4.1), т.е. NV = 3 и L = 3, следователно минималният брой експерименти, които трябва да бъдат проведени, ще бъде:

$$N_{Taguchi} = 1+3(3-1) = 7, \text{ минимален брой опити} \qquad (3.8)$$

Трябва да се избере ортогонален масив по такъв начин, че общият брой експериментални серии в основния експеримент да бъде по-голям от общия DF (Уравнение 4.8) на експеримента. Следователно трябва да се проведат поне 7 експеримента. Въз основа на

този ортогонален масив (ОА) трябва да се избере този, който има най-малко 7 реда, т.е. експериментални серии. Тагучи идентифицира няколко основни ортогонални масива, които той нарече „стандартни ОА“: L4(2^3), L8 (^{27}), L9 (3^4) L12 (2^{11}), L15 (4^5), L16(2^{15}) L'16(2^{15}), L27 (3^{13}) и др., изброени в таблица 3.2., според Tapan B. [105] (1993). Следователно първият ортогонален масив, който може да бъде избран, е L9 (33). В тази докторска дисертация изследване L9 (3^3) е достатъчно.

3.5 Заключение

- Методът Тагучи определя "оптимизирането" като определяне на най-добрите нива на контролни фактори, при които съотношението сигнал/шум е максимално.
- Експериментите, използвани за определяне на най-добрите нива, се основават на ортогонални масиви, които са балансирани по отношение на всички контролни фактори, като същевременно са малко на брой.
- В резултат на това ресурсите (материали и време), необходими за тестовете, са също така минимални.
- Подходът на Тагучи като метод за оптимизация на процеса се основава на осем процеса на планиране, провеждане и анализиране на данни от матрични експерименти, за да се открият оптималните нива на контролните параметри.
- Основната цел е поддържането на малка вариация на изхода въпреки наличието на шумни входове, което прави процеса стабилен, т.е. устойчив на всякакви вариации.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА МЕТОДИКА

4.1 Преглед на Глава 4

Целта на тази глава е да предостави необходимата експериментална информация за машинните инструменти, измервателните устройства, материала на детайла, режещите инструменти и стойностите и нивата на параметрите на обработка, както и протокола, използван в това изследване.

4.2 Оценка на обработваемостта и протокол за измерване

За експериментиране на оценката на обработваемостта на материала на детайла от сплав Inconel718, режещите инструменти и техните параметри са обяснени в следващите подраздели.

4.2.1.1 Машинен инструмент

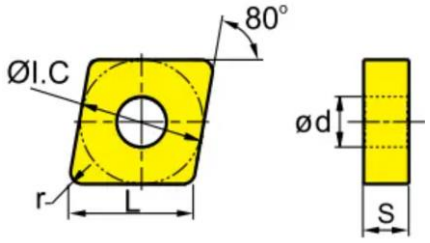
Експериментите бяха проведени при условия на сухо рязане на машинен CNC струг GOODWAY, тип GLS-200 M Фигура 4.1. със следните спецификации:

- Капацитет 51 mm
- Мощност 7.5 kW
- Диаметър на завъртане 280 mm
- Люлка 500 mm
- Дължина на машината 340 mm
- Максимална скорост 4200 rpm
- Контрол CNC

4.2.1.2 Режещи пластини

В това изследване, твърдосплавни инструментални вложки съгласно ISO спецификация CCMT09T308N-SU Sumitomo клас AC5005S, покрити с PVD ултра многослоен тънкослоен процес AlTiSiN, се използват за тестовете за крайно струговане на сплавта Inconel 718. Вложките са здраво закрепени към държач за инструменти SCLCR 2020 K89, Фигура 4.2.

Фигура 4.1 CNC струг GLS-200 M



Ø I.C=9.925; S= 3.97; Ød=4.4; r=0.8

a) b)

Фигура 4. 2. a) Ножодържач SCLCR 2020 K89 - Techno Takim, b) Режеща пластина CCMT 09T308N

4.2.1.3 Апарат за измерване на грапавостта на повърхността

Устройството за тестване на грапавостта на повърхността Mitutoyo SJ-310 беше използвано в изследването за измерване на средноаритметичната стойност на отклоненията на профила (Ra). Фигура 4.3 показва тестер, използван за експериментиране. Таблица 4.1 показва общите спецификации на уреда за измерване на повърхностна твърдост, използван по време на експеримента, със следните спецификации:

Таблица 4.1 Основни параметри на апарата за измерване на грапавост

Измервана скорост	0.25, 0.50, and 75 mm/s
Скорост на връщане	1 mm/s
Оценена дължина	12.5 mm
Тип детектор	Differential inductance
Сила на плъзгане	0.75 mN
Стандарт за грапавост	JIS, DIN, ISO, ANSI
Дължина на вземане на проби	0.25mm, 0.8mm and 2.5mm
Обхват на показване	0.01-100 µ

Всички стойности на грапавостта бяха измерени три пъти и само средните стойности бяха изчислени, за да се сведат до минимум експерименталните грешки.

Фигура 4. 3 Измерване на грапавост с Mitutoyo SJ-310

4.2.1.4 Оптичен микроскоп

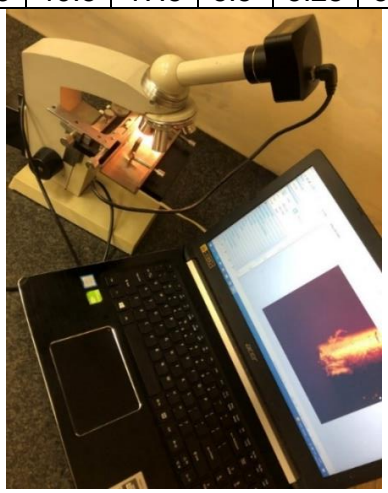
Измерването на износването на инструмента беше извършено на оптичен микроскоп за режещ инструмент Carl Zeiss с увеличение 15 x 8, което позволява движение по три оси Фигура 4.4. Дигитална камера AmScope MU1403B, оборудвана със софтуер за Windows, е монтирана на оптичния микроскоп, което позволява разработка, измерване, редактиране и съхранение на изображения.

4.2.2 Материал на заготовката

Материалът на детайла, използван като образец за изпитване, е горещо обработена сплав Inconel 718, кръгъл прът от образец за изпитване с диаметър ∅63,5 mm и дължина 500 mm се използва за тестовете за струговане при рязане. Съюзникът Inconel 718 е произведен в Обединеното кралство и материалът е сертифициран от Special Metals Wiggin Limited със сертификат за проверка № 433803 v 1, 28 август 2020 г., съгласно стандарт EN 10204-3.1/ISO 9001/EN/AS/JISQ 9100 , представено в Приложение F. Химическият състав по тегловни проценти и механичните свойства на Inconel 718 ally са дадени съответно в Таблица 4.2 и 4.3.

Таблица 4.1 Химичен състав на Inconel 718

C	Si	Mn	Al	Co	Cr	Fe	Mo	Nb	Ni	Ti	Se
0.03	0.06	0.07	0.49	0.25	19.3	17.3	3.3	5.28	52.9	0.96	≤3



Фигура 4.4 Оптичен микроскоп Carl Zeiss с цифрова камера AmScope MU1403B 14MP

Таблица 4.2 Механични свойства на Inconel 718

Якост на опън (MPa)	Провлачване (MPa)	Модул на Юнг (MPa)	Плътност (kg/m^3)	Точка на топене(°C)	Твърдост (HBW)	Твърдост след термична обработка (HBW)	Топлопроводимост (W/mK)
1197	1248	205×10^3	819	1290	245	411	11.20

4.2.3 Определяне на параметрите на обработка и техните нива

Теоретичните познания, представени в третата глава, обясняват функционалната връзка на входните, независимо променливи количества с изходните, зависимо

променливи количества на процедурите за обработка на отделяне на частици.

Въз основа на тези констатации бяха избрани входните размери, които ще опишат задоволително реакциите или изходните стойности на изследваната процедура на обработка. Една от основните задачи на металообработващите машини е да позволяват извършването на обработващи операции с необходимата твърдост, да поемат вибрациите, генерирани по време на обработката, и да осигурят необходимата мощност на обработка. Всичко по-горе зависи от материала на детайла, от геометрията и материала на режещия инструмент и от приложените параметри на обработка.

Насоките за избор на зони на параметрите на обработка, съгласно препоръките на производителя на инструмента и съществуващата база данни не са напълно задоволителни. Следователно, за материала на детайла, използван в това изследване и вложките на прилаганите режещи инструменти, са извършени обширни предварителни тестове, които определят границата на стойностите на параметрите на обработка, т.е. диапазона на входните променливи. Предишните тестове определят критериите за износване на инструмента за приложената режеща плоча VB_{max}= 0,3 mm. Факторните нива на параметрите на обработка, които трябва да бъдат изследвани, и приписването на нивата са показани в таблица 4.3.

Таблица 4.3 Параметри на обработка

Параметри на рязане	Символ	Мярка	Нива		
			1	2	3
Скорост на рязане	v	m/min	100	120	140
Подавателна скорост	f	mm/rev	0.071	0.092	0.125
Дълбочина на рязане	d	mm	0.2	0.4	0.6

Въз основа на дизайна на експериментите (DOE), Глава 3, се използва L9 (3^3) дизайн на ортогонален масив на Тагучи, тъй като дава относително точна прогноза за всички средни стойности на променливите на отговора и същото е показано в таблици 4.4 и 4.5.

Таблица 4.4 Оформление на кодирана експериментална матрица с използване на L9 ортогонален масив за R_a, VB и TL

№	Скорост (m/min)	Подаване (mm/rev)	Дълбочина (mm)	Ra (µm)	VB(µm)	TL (min)
1	1	1	1	0.23	80	30.44
2	1	2	2	0.30	85	28.25
3	1	3	3	0.32	92	25.91
4	2	1	2	0.24	110	24.53
5	2	2	3	0.28	121	23.35
6	2	3	1	0.31	120	24.12
7	3	1	3	0.20	152	18.41
8	3	2	1	0.23	153	18.18
9	3	3	2	0.28	170	14.8

Таблица 4.5 Естествено експериментално матрично оформление, използващо L9 ортогонален масив за R_a, VB and TL

№	Скорост (m/min)	Подаване (mm/rev)	Дълбочина (mm)	Ra (µm)	VB (µm)	TL (min)
1	100	0.071	0.2	0.23	80	30.44
2	100	0.092	0.4	0.30	85	28.25
3	100	0.125	0.6	0.32	92	25.91
4	120	0.071	0.4	0.24	110	24.53
5	120	0.092	0.6	0.28	121	23.35
6	120	0.125	0.2	0.31	120	24.12
7	140	0.071	0.6	0.20	152	18.41
8	140	0.092	0.2	0.23	153	18.18
9	140	0.125	0.4	0.28	170	14.8

4.2.4 Експериментална работа

За да се извършат експерименталните тестове на CNC струг GOODWAY, 3D дизайнът на модела на детайла беше направен в софтуера SolidWorks CAD и след това чрез софтуера AZ-CAM беше програмиран, за да се изчисли пътя на рязане на тестове въз основа на дизайна на експериментите на Тагучи, представен в Приложение А.

Експерименталните тестове бяха проведени по метода на Тагучи съгласно стандартната ортогонална решетка L9(3^3), Таблица 3.3, съответно Таблица 4.5.

4.2.4.1 Процес на измерване на грапавостта на повърхността

Грапавостта на повърхността се измерва с помощта на преносим профилометър тип стилус, Mitutoyo SJ 310. Профилометърът е настроен на гранична дължина λc = 0,8 mm, 2CR филтър, напречна скорост 1 mm/s и напречна дължина 4 mm мм. Грапавостта на повърхността (Ra) се измерва чрез поставяне на писеца перпендикулярно на маркировките за скорост на подаване върху обработената повърхност към края на среза и стойностите на измерване на грапавостта на повърхността са показани в таблици 4.4 и 4.5, докато съответните им профили са показани в допълнение В., Фигура В-1 до В-9.

4.2.4.2 Процес на измерване на износването на инструмента

Оценката на живота на инструмента включва серия от тестове, които трябва да се извършат при различни условия на рязане, докато режещият инструмент се повреди. Тази процедура не само отнема редица инструменти, но също така изисква много време и работен материал, особено по време на условията на процеса на обработка, осигуряващи по-дълъг живот на инструмента, както се съобщава от Mehrban et al. [40] (2008 г.). В настоящата работа беше възприета методология, при която процесът на обработка се извършва в 7-8 преминавания при всяко изпитване на условията на рязане с дължина от 125 mm, в серия от девет опита, като всеки път се заменя нов режещ ръб.

Таблица 4.6 Естествено експериментално матрично оформление, използващо L9 ортогонален масив за износване на инструмента и живот на инструмента

No	Параметри на рязане			Технологични параметри		Измерени стойности					Екстраполационни стойности наTL (min) за VB_{max} = 300 (μm)	
				Dv-Average DIA n - rotation/min.	Подредба на измерване	1	2	3	4		TL = (VB_{max} - a) / b	
	V	F	d	D_{av} / n		Номер операции				Tot.		
1	100	0.071	0.2	60/531	Np	2	2	2	2	8	a	18.728
					VB (mm)	80	160	200	264		b	9.242
					t (min)	6.63	13.27	19.9	26.54		TL	30.44
2	100	0.092	0.4	58/549	Np	2	2	2	2	8	a	39.333
					VB (mm)	85	150	175	222		b	9.226
					t (min)	4.95	9.9	14.85	19.8		TL	28.25
3	100	0.125	0.6	56/569	Np	2	2	2	2	8	a	59.302
					VB (mm)	92	160	170	190		b	9.289
					t (min)	3.52	7.03	10.55	14.07		TL	25.91
4	120	0.071	0.4	54/708	Np	2	2	2	2	8	a	61.602
					VB (mm)	110	171	184	255		b	9.718
					t (min)	4.98	9.95	14.93	19.9		TL	24.53
5	120	0.092	0.6	52/735	Np	2	2	2	2	8	a	87.303
					VB (mm)	121	180	194	222		b	9.107
					t (min)	3.7	7.39	11.09	14.79		TL	23.35
6	120	0.125	0.2	50/764	Np	2	2	2	2	8	a	91.63
					VB (mm)	120	130	190	205		b	10.828
					t (min)	2.62	6.54	7.85	10.47		TL	19.24
7	140	0.071	0.6	48/929	Np	2	3	2		7	a	120.816
					VB (mm)	152	188	204			b	8.228
					t (min)	3.79	9.48	13.27			TL	18.41
8	140	0.092	0.2	46/969	Np	2	3	2		7	a	126.238
					VB (mm)	153	182	215			b	9.558
					t (min)	2.8	7.01	9.81			TL	18.18
9	140	0.125	0.4	44/1013	Np	2	3	2		7	a	150.034
					VB (mm)	170	225	230			b	10.135
					t (min)	1.97	4.93	6.91			TL	14.80

Първите две преминавания бяха използвани за определяне на модела на износване на страните на инструмента (VB) и получените резултати са показани в раздели 4.4 съответно 4.5. Стойността на страничното износване на режещата пластина се измерва след всеки 1-3 преминавания под оптичен микроскоп на инструменти и направените изображения се съхраняват в Приложение С (Фигура С-1 до С-33), докато времето за ограничаване на износването на инструмента е оценени въз основа на общия брой преминавания и от екстраполацията на кривите на износване-време съгласно

уравнението. (2.22), съхраняван в Приложение D (Фигура D-1 до D-9), това означава, че животът на инструмента се оценява чрез монтиране на най-подходяща линия върху данните, попадащи в стабилното (равномерна) зона на износване и след това намиране на времето, за което ще настъпи максимално износване на страните от 300 µm, и получените резултати са представени в таблица 4.6. Критерият за максимално износване на страните от 300 µm се основава на литературата, както и на препоръките на производителя.

4.3 Заключение

Тази глава предоставя подробно обяснение на методологията на експерименталното тестване във връзка с техниките за измерване и ограничаващите критерии, които са използвани за постигане на целите на изследването.

• Протоколът за измерване на параметъра грапавост на повърхността (Ra),

• Протокол за измерване на износването на инструмента (VB) с критична максимална гранична стойност от 300 µm

• Определяне на времето за живот на инструмента (TL) въз основа на критичната стойност на износване на инструмента чрез екстраполация на кривите на износване във времето за девет експериментални теста.

5. МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НА ОТГОВОР ПРИ МАШИННА ОБРАБОТИМОСТ

5.1 Преглед на Глава 5

Тази глава представя обработката и анализа на експериментални данни, както и опит за разработване на подходящи математически модели с множествена регресия от първи ред, които ще определят степента на влияние на параметрите на обработка върху ефективността на измерванията, получени от експеримента, разработен в предишна глава. Ортогоналната матрица L9 на Тагучи беше използвана за намиране на оптималното ниво на експериментални фактори за минимизиране на износването на инструмента, максимизиране на живота на инструмента и минимизиране на грапавостта на повърхността. Експерименталните резултати за грапавостта на повърхността (Ra), износването на инструмента (VB) и живота на инструмента (TL) бяха анализирани чрез анализ на дисперсията (ANOVA), нормален тест, линейна регресия от първи ред, анализ на оптимизатора на отговора и техника на подход Taguchi, използвайки софтуер Minitab 18.

5.2 Математическо моделиране на грапавостта на повърхността, износването и живота на инструмента

Експерименталните резултати, получени в предишната глава, се използват за извеждане на математическите модели на реакцията на обработваемост като грапавост на повърхността, износване на страните и живот на инструмента чрез регресионен анализ. Тези модели предоставят възможност за класиране на оптималните параметри на обработка от оптимално приложимите решения.

5.2.1 Регресионен анализ

За целите на това изследване техниката Taguchi служи както като методология за експерименталния дизайн, така и като метод за анализ. Експерименталните резултати се анализират чрез статистически метод за измерване на производителността, известен като съотношението S/N. Оценката на получените експериментални резултати се извършва чрез превръщането им в съотношението сигнал-шум (S/N). Изчисляването на съотношения S/N изисква използването на един от трите метода, в зависимост от вида на измерваната характеристика: номиналният метод, по-малкият е по-добър метод или по-големият е по-добър метод. Тъй като е желателно стойностите на грапавостта на повърхността да бъдат най-малките, за да се определят стойностите на S/N в това изследване, формулата съответства на принципа „по-малкото е по-добро“, дадено в уравнение. (3.4). Регресионният анализ представя връзката между променливите според математически модел, който отговаря на набор от примерни данни [5.1]. В този случай регресионният модел е както следва: В този случай регресионният модел без факторно взаимодействие е както следва:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 \quad (5.1)$$

където: y е оценката на отговора на обработваемостта чрез регресионен модел, x_1, x_2, x_3,..., представляващи съответно фактори за обработка. Коефициентите на регресия b_1, b_2,... b_3 са съответните оценени ефекти, а b_0 е равно на общата средна реакция на обработваемост.

5.2.1.1 Дисперсионен анализ (ANOVA)

Беше споменато по-рано, че трябва да се извърши тестът за значимостта на регресионния модел, тестът за значимостта на отделните коефициенти на модела и тестът за липса на съответствие. Таблиците за анализ на дисперсии обикновено се използват за обобщаване на проведените тестови експерименти. Таблици 5.1 до 5.3 показват таблиците ANOVA за моделите на повърхността на линейния отговор Eq. 5.2 до 5.4 за грапавост на повърхността, износване на инструмента и живот на инструмента. Експерименталният дизайн и статистическият анализ бяха извършени съгласно метода Taguchi с помощта на софтуер Minitab 18. Експерименталните резултати за стойностите на грапавостта на повърхността (Ra), износването на инструмента (VB) и живота на инструмента (TL) бяха анализирани с анализ на дисперсията (ANOVA), използван за идентифициране на значимостта на факторите върху отговорите на обработваемостта. Резултатите от ANOVA на грапавостта на повърхността, износването на инструмента и живота на инструмента са дадени в таблици 5.1, 5.2 и 5.3. Този статистически анализ беше извършен за ниво на значимост α = 0,05, т.е. за ниво на достоверност от 95%. Счита се, че източниците с P-стойности (P<0,05) имат статистически значим принос към мерките за ефективност, докладвани от Rao и Kambagowni [113] (2016).

Таблица 5.1 показва резултатите от ANOVA за грапавостта на повърхността. От резултатите е видно, че скоростта на подаване (f) е най-значимият параметър с неговия принос от 65,70%, след това скоростта на рязане (v) като вторичен фактор с 23,30% и дълбочината на рязане (d) като трети влияещ фактор с от 1,07% вноска. Тъй като от анализа на таблица 5.1 може да се види, че P-стойностите на скоростта на рязане (0,019) и скоростта на подаване (0,02) са по-малки от нивото на значимост α = 0,05, тогава може да се заключи, че първите два фактора влияещи върху грапавостта на повърхността имат най-голямо значение, докато дълбочината на рязане с нейната P-стойност (0,496) по-голяма от (0,05) е незначителна. Таблица 5.2 и 5.3 показва резултатите от ANOVA за износване и живот на инструмента. Анализът на раздели 5.5 и 5.6 установи, че първият фактор, влияещ върху износването на инструмента (VB) и живота на инструмента (TL), е скоростта на рязане с нейния принос от 95,18%, съответно 89,00%, след това скоростта на подаване с 3 ,22%, съответно 5,94% и дълбочината на рязане с 0,29%, съответно 2,07% като вторични фактори, има по-малко значение при контролиране на износването на инструмента (VB) и живота на инструмента (TL). анализ на таблица 5.2 е видно, че P - стойностите на регресионния модел (0,0001), скоростта на рязане (0,0001) и скоростта на подаване (0,017) са по-малки от (0,05), което означава, че те значително влияят върху износването на инструмента, докато дълбочината на рязане с неговата P-стойност (0,342) е по-малко значима.

Таблица 5.3 показва резултатите от ANOVA за живота на инструмента. От резултатите може да се види, че скоростта на рязане (v) е най-значимият параметър с принос от 89%, следван от подаването (f) с 5,94 % и дълбочината на рязане (d) с 2,07 % има по-малко значение за контролиране на стойностния живот на инструмента. От анализа на таблица 5.3 е видно, че P - стойностите на регресионния модел (0.0001), скоростта на рязане (0.0001) и скоростта на подаване (0.025) са по-малки от (0.05), което означава, че те значително влияят върху живота на инструмента, докато дълбочината на рязане с нейната P-стойност (0,1211) е по-малко значима.

5.2.1.2 Предсказуеми математически модели на грапавостта на повърхността, износването на инструмента и живота на инструмента

Връзката между параметрите на обработка (скорост на рязане, скорост на подаване и дълбочина на рязане) и реакциите на обработка като грапавост на повърхността (Ra), износване на инструмента (VB) и живот на инструмента (TL) бяха моделирани чрез линейна регресия въз основа на уравнение. 5.1. Коефициентите на линейна регресия b_1, b_2, b_3 и b_0 са определени с помощта на софтуер Minitab-18, както е показано в таблици 5.1, 5.2 и 5.3. Получените прогнозни модели са представени в

следните уравнения:

Таблица 5.1 Анализ на дисперсията за грапавостта на повърхността

Регресионен анализ: Ra срещу v; f; d
Анализ на дисперсията

Източник	DF	Seq SS	Принос	Adj SS	Adj MS	F-Стойност	P-Стойност
Регресия	3	0,012629	90,07%	0,012629	0,004210	15,11	0,006
v	1	0,003267	23,30%	0,003267	0,003267	11,73	0,019
f	1	0,009213	65,70%	0,009213	0,009213	33,07	0,002
d	1	0,000150	1,07%	0,000150	0,000150	0,54	0,496
Грешка	5	0,001393	9,93%	0,001393	0,000279		
Общо	8	0,014022	100,00%				

Резюме на модела

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0,0166900	90,07%	84,11%	0,0058786	58,08%

Регресионно уравнение

Ra = 0,2574 - 0,001167 v + 1,439 f + 0,0250 d

Таблица 5.2 Анализ на дисперсията за износване на инструмента (VB)

Регресионен анализ: VB срещу v; f; d
Анализ на дисперсията

Източник	DF	Seq SS	Принос	Adj SS	Adj MS	F-Стойност	P-Стойност
Регресия	3	8212,88	98,69%	212,88	737,63	125,44	0,00004
v	1	7920,67	95,18%	920,67	920,67	362,92	0,00001
f	1	268,21	3,22%	268,21	268,21	12,29	0,017
d	1	24,00	0,29%	24,00	24,00	1,10	0,342
Грешка	5	109,12	1,31%	109,12	21,82		
Общо	8	8322,00	00,00%				

Резюме на модела

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
4,67168	98,69%	97,90%	1,828	95,29%

Регресионно уравнение

VB = -125,2 + 1,8167 v + 245,6 f + 10,00 d

Таблица 5.3 Анализ на дисперсията за живота на инструмента

Регресионен анализ: VB срещу v; f; d
Анализ на дисперсията

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	200,370	97,02%	200,370	66,790	54,18	0,00031
v	1	183,817	89,00%	183,817	183,817	149,11	0,00007
f	1	12,268	5,94%	12,268	12,268	9,95	0,02524
d	1	4,284	2,07%	4,284	4,284	3,48	0,12111
Грешка	5	6,164	2,98%	6,164	1,233		
Общо	8	206,534	100,00%				

Резюме на модела

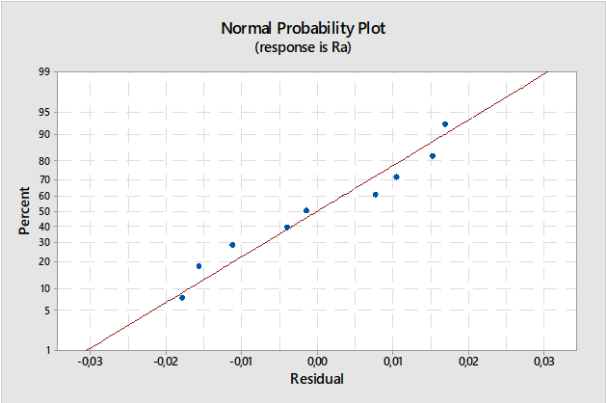
S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
1,11028	97,02%	95,23%	20,9700	89,85%

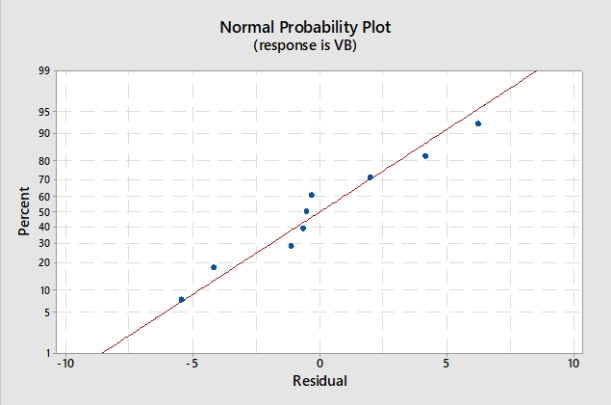
Регресионно уравнение
TL = 63,05 – 0,2768 v – 52,5 f – 4,23 d

$$Ra = 0.2574 - 0.001167\ v + 1.439\ f + 0.0250\ d \quad (\mu m) \quad (5.2)$$
$$VB = -125.2 + 1.8167\ v + 245.6\ f + 10\ d \quad (\mu m) \quad (5.3)$$
$$TL = 63.05 - 0.2768\ v - 52.5\ f - 4.23\ d \quad (min) \quad (5.4)$$

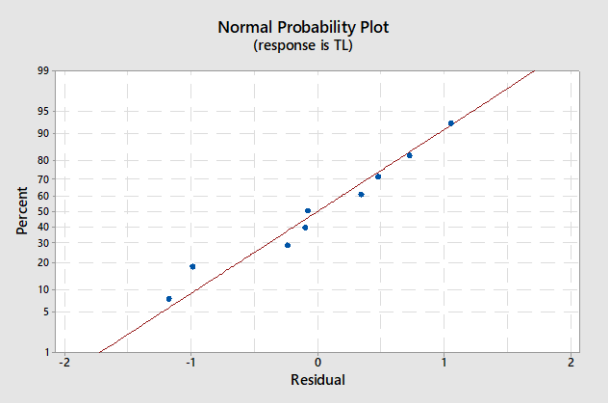
5.2.1.2.1 Валидиране на прогнозни модели

За да се тества статистическата валидност на предсказуемите модели, трябва да се оценят някои анализи и диагностични графики, като Графиките на нормалната вероятност на уравнения 5.2 до 5.4, показани на фигури 5.1 до 5.3, и F-статистически тест от резултатите от Анализ на Раздели за отклонение 5.1 до 5.3.





Фигура 5.1 Нормална вероятност за Ra Фигура 5.2 Нормална вероятност за VB



Фигура 5.2 Диаграми на нормалната вероятност за TL

Както се вижда на фигури 5.1 до 5.3, остатъците следват приблизително права линия в нормалните графики на остатъците, което означава, че грешките са нормално разпределени. Това разпределение, показано на фигурите по-горе, показва, че предположението за нормалност на грешката е валидно.

Това осигурява подкрепа за разработените прогнозни линейни регресионни модели на грапавостта на повърхността, износването на инструмента и уравнението за живот на инструмента. 5.2 до 5.4, че са статистически значими, адекватни и точни, което е в съответствие със съответните F-статистически стойности (15.11; 125.44 и 54.18) и P - стойности (0.006; 0.00004 и 0.00031) и е по-малко от 0.6; 0,004 и 0,031 процента шанс, че критичен

F - стойност може да възникне поради шум.

От анализа на раздели 5.1 до 5.3 е очевидно, че изчислените съответни F-стойности (66.15; 125.44 и 54,18) на Ra, VB и TL са по-високи от критичната F-стойност на таблицата F(DF1/DF2) =F(3/5)=5,4095), както се вижда от таблиците на ръководството на Beyer W. [114] (2017). В F - таблицата с критични стойности колоните определят числителя на степените на свобода (DF1), докато редовете определят знаменателя (DF2).

F-тестът изглежда е статистически тест, който най-често се използва при сравняване на статистически модели, които са били монтирани към набор от данни, за да се идентифицира моделът, който най-добре отговаря на популацията, от която са

извлечени данните.

Ако стойността на F-статистическия тест е по-висока от статистиката, изчислена от нулевата хипотеза, тогава може да се заключи статистически значима връзка между предиктора и променливата на резултата.

5.2.1.3 Анализ на Тагучи: Съотношение сигнал - шум (STN).

В метода на Тагучи терминът S - означава сигнал и представлява желаната стойност, а N - шум представлява нежеланата стойност. Параметрите на процеса (факторите) с най-високото съотношение S/N (STN) винаги дават най-доброто качество с минимална дисперсия, както се съобщава в неговата книга от Phadke M. [104] (1989).

Таблица 5.4 Резултати от експеримента и коефициент STN за грапавост на повърхността

№	Скорост (m/min)	Подаване (mm/rev)	Дълбочина (mm)	Ra (μm)	S/N
1	100	0.071	0.2	0.23	12.8033
2	100	0.092	0.4	0.30	10.3980
3	100	0.125	0.6	0.32	9.8429
4	120	0.071	0.4	0.24	12.3958
5	120	0.092	0.6	0.28	11.1641
6	120	0.125	0.2	0.31	10.1915
7	140	0.071	0.6	0.20	14.1328
8	140	0.092	0.2	0.23	12.7278
9	140	0.125	0.4	0.28	10.9387

Таблица 5.5 Резултати от експеримента и коефициент STN за износване на инструмента

№	Скорост (m/min)	Подаване (mm/rev)	Дълбочина (mm)	Ra (μm)	S/N
1	100	0.071	0.2	80	-38.0618
2	100	0.092	0.4	85	-38.5884
3	100	0.125	0.6	92	-39.2758
4	120	0.071	0.4	110	-40.8279
5	120	0.092	0.6	121	-41.6557
6	120	0.125	0.2	120	-41.5836
7	140	0.071	0.6	152	-43.6369
8	140	0.092	0.2	153	-43.6938
9	140	0.125	0.4	170	-44.609

Таблица 5.6 Резултати от експеримента и съотношение STN за живот на инструмента

№	Скорост (m/min)	Подаване (mm/rev)	Дълбочина (mm)	Ra (μm)	S/N
1	100	0.071	0.2	30.44	29.66889
2	100	0.092	0.4	28.25	29.02037
3	100	0.125	0.6	25.91	28.26935
4	120	0.071	0.4	24.53	27.79395
5	120	0.092	0.6	23.35	27.36574
6	120	0.125	0.2	24.12	27.64755
7	140	0.071	0.6	18.41	25.30108
8	140	0.092	0.2	18.18	25.19188
9	140	0.125	0.4	14.8	23.40523

Таблица 5.7 Резултати при STN съотношения и средни стойности за Ra, VB и TL

Taguchi Analysis: Ra versus v; f; d
Response Table for Signal to Noise Ratios
Smaller is better

Level	v	f	d
1	11,04	13,05	11,90
2	11,21	11,43	11,30
3	12,60	10,38	11,64
Delta	1,56	2,67	0,60
Rank	2	1	3

Response Table for Means

Level	v	f	d
1	0,2833	0,2233	0,2567
2	0,2767	0,2700	0,2733
3	0,2367	0,3033	0,2667
Delta	0,0467	0,0800	0,0167
Rank	2	1	3

Taguchi Analysis: VB versus v; f; d
Response Table for Signal to Noise Ratios
Smaller is better

Level	v	f	d
1	-38,64	-40,84	-41,11
2	-41,36	-41,31	-41,34
3	-43,98	-41,82	-41,52
Delta	5,34	0,98	0,41
Rank	1	2	3

Response Table for Means

Level	v	f	d
1	85,67	114,00	117,67
2	117,00	119,67	121,67
3	158,33	127,33	121,67
Delta	72,67	13,33	4,00
Rank	1	2	3

Taguchi Analysis: TL versus v; f; d
Response Table for Signal to Noise Ratios
Larger is better

Level	v	f	d
1	28,99	27,59	27,50
2	27,60	27,19	26,74
3	24,63	26,44	26,98
Delta	4,35	1,15	0,76
Rank	1	2	3

Response Table for Means

Level	v	f	d
1	28,20	24,46	24,25
2	24,00	23,26	22,53
3	17,13	21,61	22,56
Delta	11,07	2,85	1,72
Rank	1	2	3

Таблици 5.4 до 5.6 показват таблицата на отговора за STN съотношението на грапавостта на повърхността, износването на инструмента и живота на инструмента.Таблици 5.4 до 5.6 показват таблицата на отговора за STN съотношението на грапавостта на повърхността, износването на инструмента и живота на инструмента. По-долу експерименталните данни бяха анализирани с помощта на метода Тагучи, чрез който съотношенията S/N и стойностите на нивата бяха изчислени с помощта на STN уравнението „колкото по-малко е по-добре“ за грапавостта на повърхността и износването на инструмента, както и „колкото по-голямо е по-добре“ за живот на инструмента при оптимални условия на рязане съгласно Таблици 5.4 до и 6.6, а получените резултати са представени в Таблици 5.7.

5.3 Оптимизиране на реакциите на обработваемост

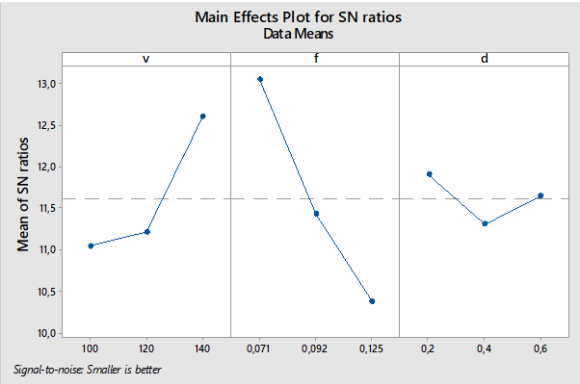
За да се реализира оптимизирането на предсказуемите математически модели от Eq.5.2 до 5.4, се изисква комбинация от факторни нива, които едновременно да изпълняват изискванията, определени за всеки от отговорите и факторите за обработваемост. В тази работа оптимизацията се извършва числено и графично въз основа на диаграмите на главните ефекти за средните стойности на съотношението STN на фигури 5.4 до 5.6, функцията за оптимизиране на реакцията на фигури 5.7 до 5.9 и контурните графики на фигури. 5.10 до 5.12, за да се определят оптималните конструктивни условия за получаване на ниски стойности на грапавостта на повърхността (Ra) и износването на инструмента (VB), както и високи стойности на издръжливостта на инструмента (TL).

5.3.1 Графики на основните ефекти за анализ на средните стойности и съотношението сигнал/шум

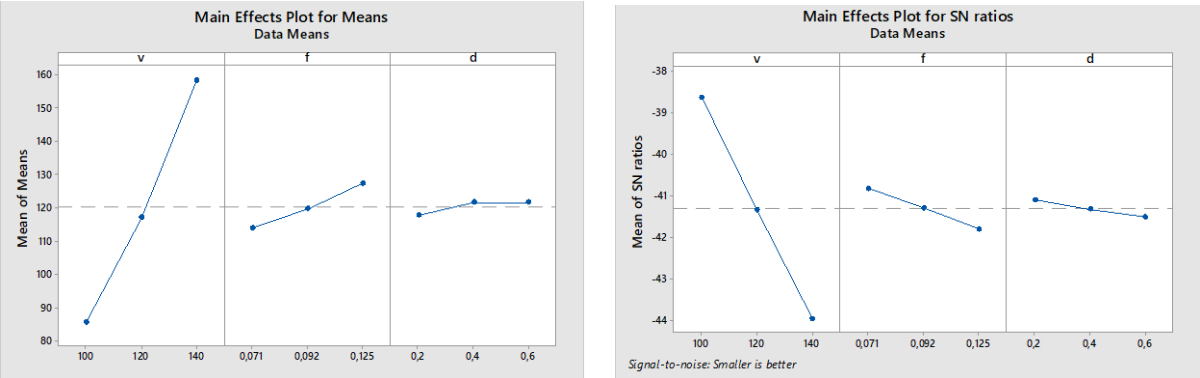
От STN съотношенията, дадени в таблица 5.7 a, b и c, са изготвени графики на основния ефект с помощта на софтуера Minitab-18 и са показани съответно на фигури 5.4 до 5.6. Графиките по-горе показват промяната на отговорите на обработваемостта с промяната в параметрите на рязане. В графиките Фигури 5.4 до 5.6, оста X показва стойността на всеки параметър на процеса на три нива, а оста Y - съответната стойност на отговора. След това се извършва анализ, за да се определи коефициентът на коригиране на всеки основен фактор от диаграмата на основните ефекти на реакцията за средната стойност и съотношението STN.

На фигура 5.4 а) и б) може да се види, че с увеличаването на нивата на скоростта на рязане (v) има значителна промяна в намаляването на грапавостта на повърхността на параметъра (Ra), докато с увеличаване на скоростта на подаване (f) също има значителна промяна, но в увеличаване на грапавостта на повърхността. От друга страна, с увеличаване на дълбочината на рязане до средното ниво се наблюдава малка промяна в увеличаването на грапавостта на повърхността, а след това до високото ниво, малка промяна в намаляването на грапавостта на повърхността се наблюдава.

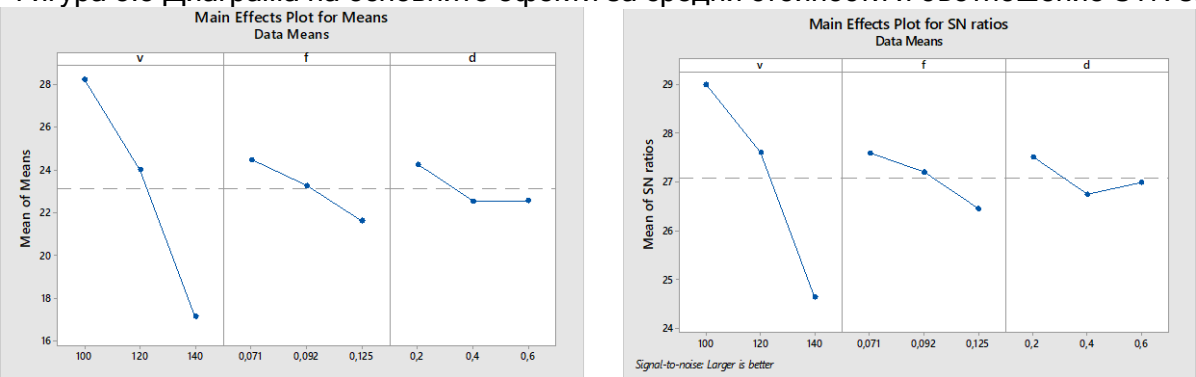
Когато Фиг. 5.4.a) и b) бяха разгледани, се видя, че ниво (3) на скоростта на рязане (v) и ниво (1) на скоростта на подаване (f) и дълбочината на рязане (d) са ефективни параметри за най-ниска стойност на грапавостта на повърхността в експерименталното изследване. Оптималните параметри на рязане за параметъра на грапавостта на повърхността Ra бяха $v_3f_1d_1$ (v3=140 m/min, f_1= 0.0.071 mm/rev и d_1=0.2 mm).



Фигура 5.4 Диаграма на основните ефекти за средни стойности и съотношение STN за Ra



Фигура 5.5 Диаграма на основните ефекти за средни стойности и съотношение STN за VB



Фигура 5.6 Диаграма на основните ефекти за средни стойности и съотношение STN на TL

Тъй като оптималната комбинация v_3, f_1, d_1 не съществува в проведената експериментална матрица, тогава стойността на параметъра на грапавостта на повърхността (Ra) за оптималните условия беше изчислена въз основа на прогнозното уравнение Формула 5.2, а стойността му е Ra=0,246 µm, както се вижда в таблица 5.8.

Таблица 5.8 Оптимални условия за грапавост на повърхността

Параметър	Най-добро ниво	Стойност	Прогнозиран-Ra, µm
Скорост на рязане, m/min	3	140	0.246
Подаване, mm/rev	1	0.071	
Дълбочина на рязане, mm	1	0.2	

Фигура 5.5 показва таблицата на реакцията за STN коефициента на износване на фланга (VB) за „по-малкото е по-добро“, получено за различни нива на параметри.

Фигура 5.6 показва диаграмата на главните ефекти на реакцията за средните стойности и таблицата на съотношението STN на издръжливостта на инструмента (TL) за „по-голямото е по-добро“, получено за различни нива на параметри.

В анализа на въздействието на съотношението STN нивото на фактора ще бъде избрано така, че да даде максималното съотношение STN като най-подходящо ниво на фактор. След изследване на фигури 5.5 и 5.6 се виждя, че скоростта на рязане на ниво 1 (v), скоростта на подаване на ниво 1 (f) и дълбочината на рязане на ниво 1 (d) са ефективни параметри за най-ниската стойност на износване на инструмента (VB) и най-високата стойност на издръжливостта на инструмента (TL) в експериментално изследване. Следователно оптималните параметри на рязане за износване на инструмента и живот на инструмента са $v_1f_1d_1$ (v_1=100m/min, f_1=0,071, mm/rev, d_1=0,2 mm), както се вижда в таблици 5.9 и 5.10.

Таблица 5.9 Оптимални условия за VB

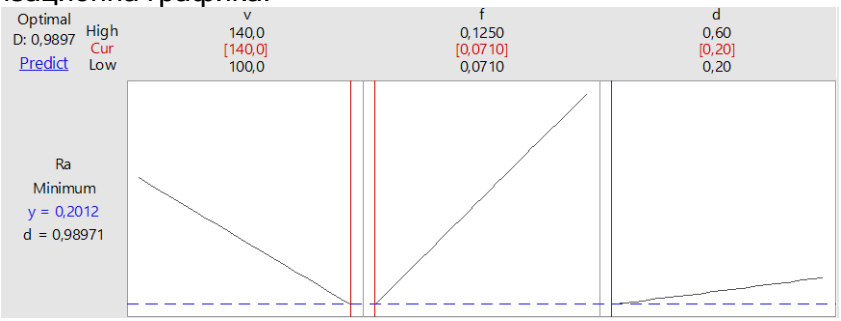
Параметър	Най-добро ниво	Стойност	Прогнозиран -VB, µm
Скорост на рязане, m/min	1	100	75.91
Подаване, mm/rev	1	0.071	
Дълбочина на рязане, mm	1	0.2	

Таблица 5.10 Оптимални условия за TL

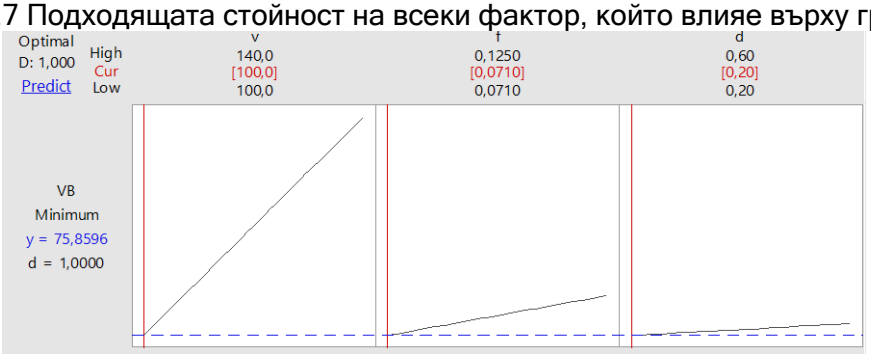
Параметър	Най-добро ниво	Стойност	Прогнозиран -TL, µm
Скорост на рязане, m/min	1	100	34.504
Подаване, mm/rev	1	0.071	
Дълбочина на рязане, mm	1	0.2	

5.3.2 Анализ на оптимизатора на реакцията

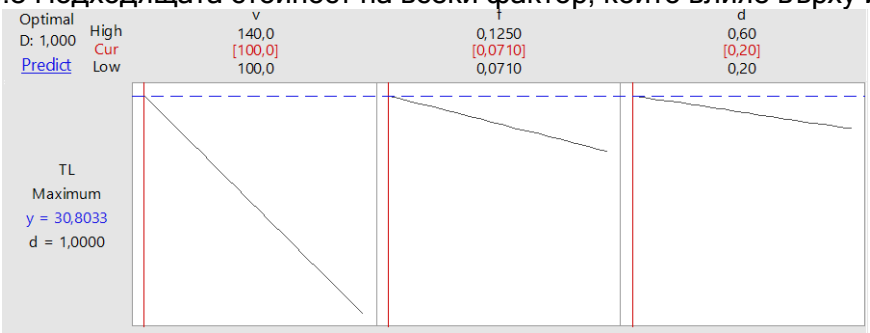
Оптимизаторът на отговора се използва за идентифициране на комбинацията от настройки на входни променливи, които оптимизират един отговор или набор от отговори. Софтуерът Minitab версия 18 извършва изчисление, за да определи най-добрата опция и създава оптимизационна графика.



Фигура 5.7 Подходящата стойност на всеки фактор, който влияе върху грапавостта



Фигура 5.8 Подходящата стойност на всеки фактор, който влияе върху износването



Фигура 5.9 Подходящата стойност на всеки фактор, който влияе върху дълготрайността

Промяната на параметрите на входните променливи в тази интерактивна схема позволява извършването на анализ на чувствителността, което може да доведе до подобряване на първоначалния отговор. За да намери най-подходящите стойности (нива) на параметрите на рязане, които най-добре влияят върху грапавостта на повърхността (Ra), износването на инструмента (VB) и живота на инструмента (TL), изследователят използва Minitab Release 18, Response Optimizer и избира желаното функция Ramin, VBmin и TLmax намери подходящите стойности на коефициентите на рязане и получените стойности са показани на фигури 5.7 до 5.9. След оценка, получените стойности за минимална грапавост на повърхността (Ra) и износване на инструмента (VB), както и за максимален живот на инструмента (TL) са както следва:

- Грапавост на повърхността: скорост на рязане (ниво 3), скорост на подаване (ниво 1) и дълбочина на рязане (ниво 1). Минималната стойност се прогнозира на 0,2012 (μm), очаква се да бъде достигната със скорост на рязане v=140 m/min, скорост на подаване f=0,071 mm/rev и дълбочина на рязане d=0,2 mm, и оптимална от d=0,9897 mm, както се вижда на фигура 5.7.
- Износване на инструмента: скорост на рязане, скорост на подаване и дълбочина на рязане, на които и трите съответстват (ниво 1), т.е. скорост на рязане v1=100 m/min, скорост на подаване f1=0,071 mm/об и дълбочина на рязане d1=0,2 mm. Предвидената минимална стойност е VB=75,8596 (μm), а оптималната d=0,9765 mm, както се вижда на фигура 5.8.

- Издръжливост на инструмента: Подходящата стойност за издръжливост на инструмента е най-високата и най-дългата стойност при 30,8033 минути. Определяйки скоростта на рязане като 100 m/min, скоростта на подаване като 0,071 mm/rev и дълбочината на рязане като 0,2 mm, т.е. оптималната стойност според фигура 5.9 е d=1 mm.

5.4 Тест за потвърждение

След определяне на оптималното ниво на параметрите на процеса, следващият етап беше да се предвиди и валидира подобряването на характеристиките на производителността, като се използва комбинацията от параметри. Техниката на Тагучи и регресионните уравнения бяха подложени на потвърждаващо тестване на параметрите на процеса на оптимални и произволни нива.

Таблица 5.11. Резултати за потвърждение за метода на Тагучи и линейна регресия

Ниво	Метод на Тагучи			Линейна регресия		
	Очакване	Прогноза	Грешка (%)	Очакване	Прогноза	Грешка (%)
Ra (µm)						
$v_3f_1d_1$(Optimum)	0.195	0.186	4.61	0.19	0.201	3.1
$v_2f_2d_2$ (Random)	0.276	0.289	4.71	0.27	0.259	6.16
$v_1f_3d_1$ (random)	0.322	0.329	2.13	0.322	0.326	1.23
VB (mµ)						
$v_1f_1d_1$(Optimum)	75	76.67	2.22	75	75.91	1.21
$v_2f_2d_2$ (Random)	118	116.67	1.13	118	119.4	1.18
$v_1f_2d_3$ (Random)	86	86.33	0.38	86	85.07	1.1
TL (min)						
$v_1f_1d_1$(Optimum)	30	29	3.33	30	30.8	2.67
$v_2f_2d_2$ (Random)	23	23.57	2.48	23	23.31	1.35
$v_3v_2d_1$(Random)	19	18.42	3.1		18.62	2

Сравнението на резултатите от теста с очакваните стойности, получени от метода на Тагучи и регресионните уравнения (Уравнения 5.2 до 5.4) е представено в Таблица 5.11. Резултатите от теста за потвърждение показват, че измерените стойности попадат в рамките на 95% доверителен интервал, така че изчисляването на процентите на грешката на характеристиките на реакцията е в приемливи граници, с изключение на произволното ниво $v_2f_2d_2$ на параметъра за грапавост на повърхността за прогнозираната линейна регресия. Констатациите показват, че методът Taguchi е надежден подход за минимизиране на грапавостта на повърхността, износването на инструмента, както и за максимизиране на живота на инструмента, което влияе върху намаляването на времето за обработка и производствените разходи, както в процеса на струговане на сплав с ЦПУ. Inconel 718. Следователно тази оптимизация може да се счита за успешна, както се вижда от резултатите от тестовете за потвърждение.

5.5 Заключение

- Експерименталните данни от струговане на Inconel 718 с използване на твърдосплавни пластини за режещи инструменти с покритие се анализират с помощта на софтуер за статистическа симулация за прогнозиране на ефекта от различни входящи параметри на обработка, като скорост на рязане, подаване и дълбочина на рязане върху грапавостта на повърхността, износването на страните на инструмента и живот на инструмента.
- Предложените модели на линейна регресия от първи ред, които най-добре отговарят на установените критерии, са обсъдени по-горе. Отговорите могат да бъдат предвидени във всяка средна точка, като се използват адекватните модели.
- ANOVA на предсказуемите регресионни модели идентифицира най-допринасящия фактор за грапавостта на повърхността е скоростта на подаване 65,70%, докато за износването на инструмента и живота на инструмента е скоростта на рязане с 95,18% съответно 89%.
- Констатациите показват, че методът Taguchi е надежден подход за минимизиране на грапавостта на повърхността, износването на инструмента, както и за максимизиране на живота на инструмента, което влияе върху намаляването на времето за обработка и производствените разходи в процеса на CNC струговане на сплав Inconel 718.
- Тази глава представи метода Taguchi като надежден метод за определяне на оптимални параметри на обработка за подобряване на характеристиките на реакция за минимална грапавост на повърхността, износване на инструмента, както и максимален живот на инструмента. Също така, експерименталният дизайн на Taguchi подобрява качеството,

намалява разходите и осигурява стабилни дизайнерски решения.

- Резултатите от тестовете за потвърждение показват, че тази оптимизация е успешна.

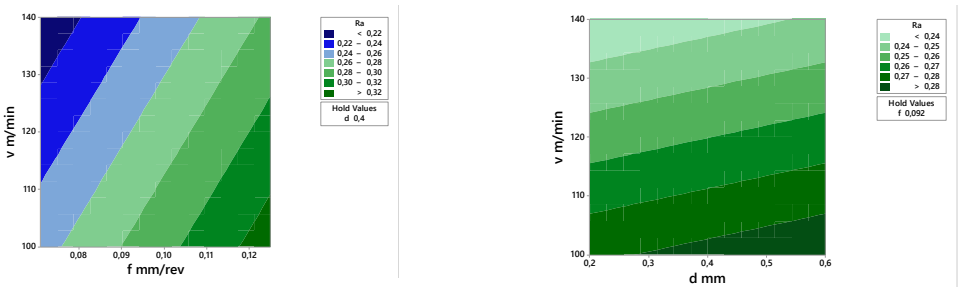
6 ГРАФИЧНА ОПТИМИЗАЦИЯ НА РЕГРЕСИОННИ МОДЕЛИ

6.1 Преглед на Глава 6

Тази глава представя графичната оптимизация и оценка на линейните регресионни модели от първи ред, получени от експериментални резултати в предходната глава Eq. 5.2 до 5.4. С помощта на софтуера Minitab -18 бяха генерирани контурни графики и повърхностни графики, които могат графично да обяснят резултата, без да навлизат в твърде много подробности в техническия аспект на темата. 2D контурните диаграми бяха използвани, за да покажат графично оптимизирането на възможните стойности на характеристиките на реакцията. В допълнение, 3D графиките на повърхността се използват за изследване на възможната връзка, която съществува между три променливи, т.е. променлива на характеристиката на реакцията и две независими променливи.

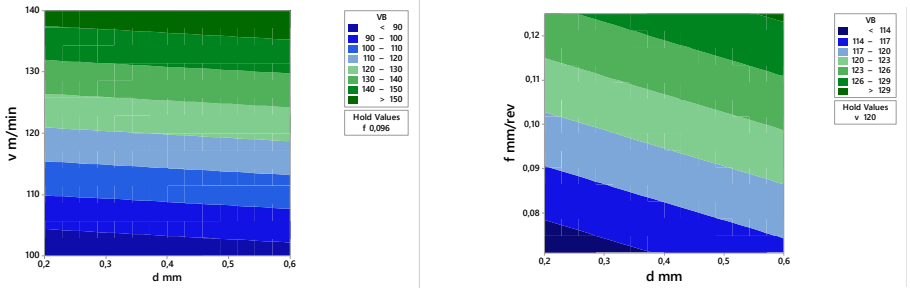
6.2 Анализ на контурни графики

Контурните диаграми позволяват да се представят триизмерни графики върху двуизмерна повърхност с помощта на предоставени входни променливи, т.е. с факторите x и y, нанесени върху скалите x и y, и стойностите на отговора, представени от контури . Фигури 6.1 до 6.3 показват контурните диаграми, получени за грапавост на повърхността (Ra), износване на страните (VB) и издръжливост на инструмента (TL) за средното ниво на факторите на рязане.



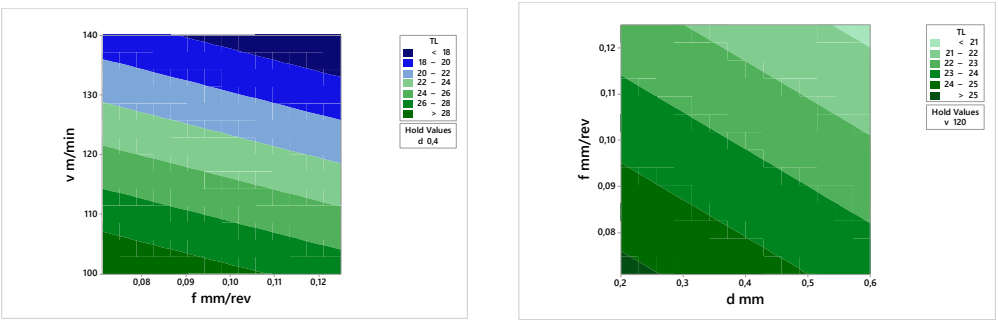
a) b)

Фигура 6.1 2D контурни диаграми; a= f-v, b=d-v; на повърхностната грапавост



a) b)

Фигура 6.2 2D контурни диаграми; a= v-d, b=f-d; износване на инструмента (VB)



a) b)

Фигура 6.3 2D контурни диаграми; a= v-f, b=f-d; живот на инструмента (TL)

Контурните диаграми, показани на фигури 6.1 a, b и c до 6.3 a, b и c, показват корелацията между скоростта на рязане и скоростта на подаване (v-f), скоростта на рязане и

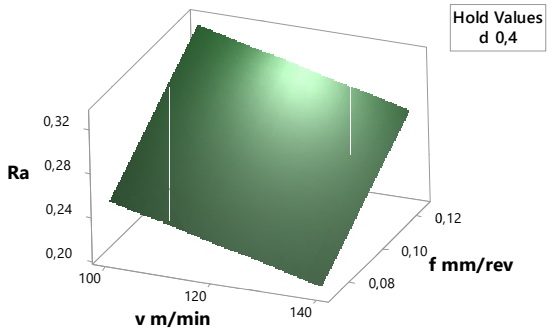
дълбочината на рязане (v-d) и скоростта на подаване и дълбочината на изрязване (d-f). От анализа на контурните диаграми, показани на фигури 6.1 a, b и c до 6.3 a, c и d, се установи, че контурните графики са правата линия. Следователно, подходящият математически модел за прогнозиране на оптималната стойност е моделът на линейна регресия Eq. 5.2. Анализирайки Фигури 6.1 a, b и c, беше наблюдавано, че най-ниската стойност на грапавостта на повърхността (Ra), открита на Фиг. 510 a, е в тъмно синята област на графиката Ra под <0,22 µm с приблизителни условия на рязане (f ≈ 0,082 mm/об, v ≈ 128 m/min и d ≈ 0,4 mm). Тъмносините области на диаграмата Фигура 6.2 a, b и c представляват области с оптимални условия на рязане на износване на инструмента, докато тъмнозелените области показват, че VB се влошава поради условията на рязане. Наблюдава се, че най-добрата стойност на VB е под <80 µm близки до условията на рязане (v ≈ 100-103 m/min, f ≈ 0,071-0,08 mm/rev и d ≈ 0,2-0,4 mm), както се вижда на фигура 6.2 c . От контурната диаграма, показана на Фигура 6.3 a, b и c, се наблюдава, че най-добрата стойност на живот на инструмента (TL) е > 28 минути в зелена тъмна зона. Фигура 6.3 c, за условията на рязане (v ≈ 100-106 m/min, f ≈ 0,071-0,10 mm и d ≈ 0,2-0,5 mm).

6.3 Анализ на повърхностни графики

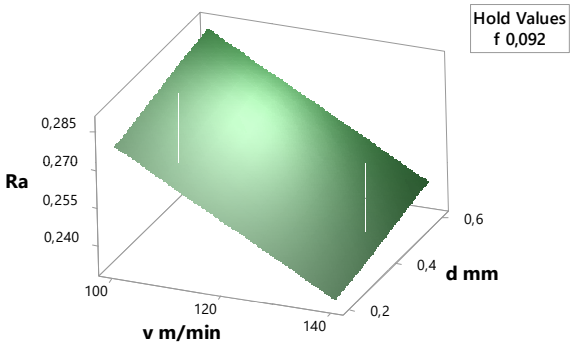
3D контурните графики са известни също като 3D повърхностни графики, използвани за представяне на триизмерни данни. 3D повърхностните диаграми са вид графика, която може да се използва, за да се изследва възможната връзка, която съществува между три променливи. Прогнозните променливи са начертани по осите x и y, докато променливата на отговор (z) е изобразена като непрекъсната повърхност (3D графика на повърхността).

В това проучване бяха начертани 3D графики на повърхността с помощта на софтуера Minitab-18, за да се намери връзката между променливи на реакцията като грапавост на повърхността (Ra), износване на инструмента (VB) и живот на инструмента TL) с параметрите на рязане (v, f и d), които са показани в Приложение E, Фигури E-1 до E-27. Повърхностните диаграми показват как една променлива на отговора се отнася към два фактора с трети задържан въз основа на модела в уравнение. 5.2 до 5.4. Те имат равнинна форма в съответствие с установения модел, т.е. линеен модел от първи ред. Фигури E-2, E5 и E-8 показват ефекта на скоростта на рязане (v), скоростта на подаване (f) и дълбочината на рязане (d) върху грапавостта на повърхността, съответно корелацията между v-f, v-d и f-d върху нея, за средното ниво на задържана стойност.

Може да се види, че с увеличаване на скоростта на рязане грапавостта на повърхността намалява, докато скоростта на подаване и дълбочината на рязане се увеличават, грапавостта на повърхността се увеличава. Фигури E-11, E-14 и E-17 показват ефекта на скоростта на рязане (v), скоростта на подаване (f) и дълбочината на рязане (d) върху износването на инструмента (VB), съответно корелацията между v-f, v-d и f-d върху него, за средно ниво на стойност на задържане. Може да се види, че с увеличаване на скоростта на рязане грапавостта на повърхността намалява, докато скоростта на подаване и дълбочината на рязане се увеличават, грапавостта на повърхността се увеличава. Фигури E20, E-23 и E-26 показват ефекта на скоростта на рязане (v), скоростта на подаване (f) и дълбочината на рязане (d) върху живота на инструмента (TL), съответно корелацията между v-f, v-d и f-d на то, за средното ниво на стойност на задържане. Тук може да се види, че с увеличаване на скоростта на рязане, скоростта на подаване и дълбочината на рязане животът на инструмента намалява.

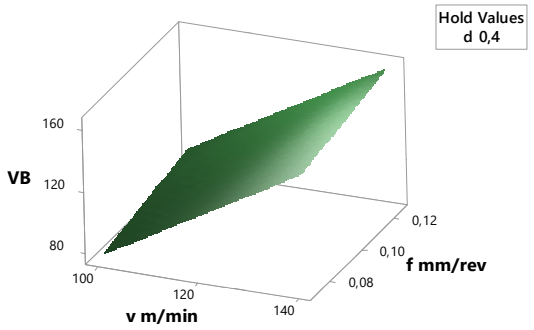


Фигура E-2 Ефект на v-f в/у 3D диаг. на Ra



Фигура E-5 Ефект на v-d в/у 3D

диаг. на Ra



Фигура *E-11* Ефект на *v-f в*/у 3D диаг. на *VB*

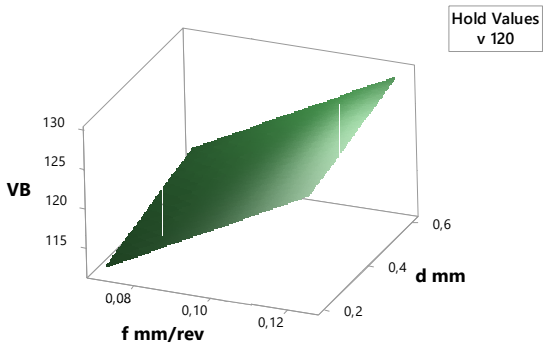
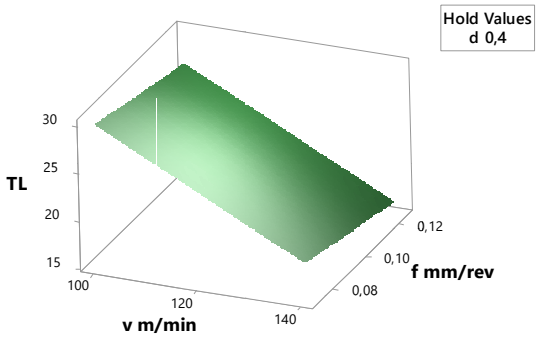
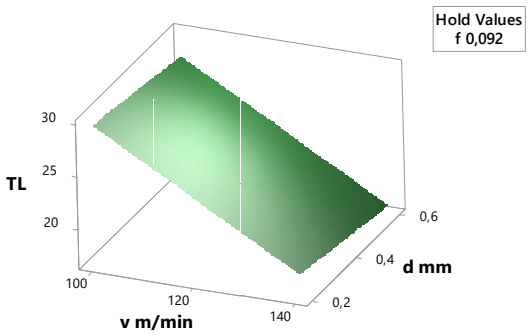


Figure E-17 Ефект на *f-d в*/у 3D диаг. на *VB*



Фигура E-20 Ефект на v-f в/у 3D диаг. на TL



Фигура E-23 Ефект на v-d в/у 3D диаг. на TL

6.4 Заключение

- В тази глава бяха конструирани модели от първи ред заедно с контурни диаграми, за да се даде възможност за по-лесен избор на подходяща комбинация от скорост на рязане, скорост на подаване и дълбочина на рязане, за да се намери оптималната област на грапавост на повърхността, износване на инструмента и живот на инструмента.
- Резултатите от графичната оптимизация са много полезни за бързо избиране на стойностите на параметрите на струговане в сервиза, за да се получи определена характеристика на реакция.
- 2D контурната диаграма като графична техника за оптимизация позволява визуален избор на оптималните условия на обработка според определен критерий.
- Също така, 2D контурни диаграми и 3D повърхностни графики на функцията за желателност при всеки оптимум могат да се използват за изследване на функцията във факторното пространство.

7 ПРИНОСИ

7.2.1 Научни приноси

- Получените математически модели, които описват връзката между параметрите на рязане и реакциите на обработка, са постигнати чрез теоретични и експериментални изследвания. Тези модели позволяват прогнозиране на износването на инструмента, живота на инструмента и грапавостта на повърхността.
- Разработване на емпирични математически модели, които интегрират експериментални, числени и аналитични знания в областта на планирането и оптимизацията на производствения процес по систематичен, научен и надежден начин.
- Точността и значимостта на предсказуемите математически модели от първи ред на реакциите на обработваемост са валидирани за условия на косо рязане въз основа на сравнение на данните от експериментални и аналитични резултати, публикувани в различни научни изследвания.

7.2.2 Научно-приложни приноси

- Резултатите от изследването позволяват формирането на база от знания, която заедно с инсталирането на подходящи сензори е необходима за получаване на интелигентна система за обработка.
- Предсказуемите модели на процеса на обработка подпомагат анализа на оптимизационните проблеми в икономиката на машинната обработка, в приложенията за оптимизация на CNC адаптивно управление (ACO) и при формулирането на симулационни модели, използвани в базите данни за рязане на метал.
- Анализът на ефекта на всеки параметър върху всяка реакция на обработка и взаимодействията между параметрите изяснява, че грапавостта на повърхността, износването на страните и живота на инструмента могат да бъдат контролирани на етапа на проектиране на процеса на рязане, което е най-ефективно и най-евтино начин.

7.2.3 Приложни приноси

- Анализът на поведението при износване на режещите инструменти обикновено се основава на обширни експериментални тестове, които отнемат време и са скъпи. Въпреки това е доказано, че използването на екстраполационен подход, базиран на кривите на износване в съответствие с уравнение 2.22, значително намалява тези разходи.
- Разработените линейни математически модели от първи ред позволяват анализ на отговорите на обработката, включително Ra, VB и TL. Те позволяват моделиране и оптимизиране на всеки отговор поотделно или едновременно, числено или графично и са подходящи за използване както в серийни, така и в масови производствени процеси на рязане.
- Проучването разкрива, че с увеличаване на параметрите на рязане процесът на износване на страните на инструмента (VB) ще се влоши.
- Проучването също така показва, че с увеличаването на някой от параметрите на рязане животът на инструмента намалява.

7.3 Препоръка за бъдещи изследвания

Съществуват обаче някои възможности за подобряване на способността за прогнозиране на моделите за реакция на обработваемостта. Въз основа на резултатите и анализа на експерименталните данни се предлагат тези препоръки за по-нататъшна работа в следните области:

- В допълнение към линейните регресионни модели от първи ред, като друга алтернатива за прогнозиране на отговорите на обработваемостта могат да се използват модели от втори ред или по-високи, както и експоненциални.
- Изследването може да бъде разширено чрез включване на повече отговори за обработваемост (както и сили на рязане, температура, мощност на машината и т.н.), за да се даде пълна картина на обработката на сплав Inconel 718.
- Проучването може да бъде разширено чрез включване на повече параметри на рязане, както и радиус на върха на инструмента, ъгъл на режещия ръб на инструмента (κr) и др.
- Провеждане на проучване на различни комбинации от материали на детайла и режещи инструменти по време на мокра и полусуха обработка.
- Геометрията на режещите вложки може да се променя, за да се изследва ефектът от различни видове вложки. Например промяна на наклонения ъгъл (γn) и ъгъла на фланга (αn).
- Настоящите тенденции в индустриалното развитие на автоматизирана измервателна техника за измерване на параметрите на износване на инструмента (VB) в реално време, ръчните и скъпи измервания на износването на инструмента ще бъдат ненужни и след като знае параметъра на износване на инструмента в реално време, операторът на машината ще може за регулиране на програмираната траектория на рязане, за да се избегне изкривяване на обработените размери поради износване на инструмента, както се посочва в изследването на Mikołajczyk et al. [110] (2018 г.).
- В бъдещи проучвания, Тагучи като метод за единична оптимизация, комбиниран с анализ на сивите връзки, може да реши многовариантните характеристики на реакцията на процеса, които обикновено са известни като многоцелева оптимизация, която има възможност да оптимизира повече зависими променливи едновременно.

III. Публикации, научни области и десиминация

A) SCOPUS

1. Fatlume Zhujani, Fitore Abdullahu, Mirlin Bruçi, and Nexhat Qehaja, (2023), Mathematical Modelling and Optimization of Surface Roughnes Based on Cutting Parameters in CNC Drilling Process Using ANOVA and Taguchi Method, Sustainable Regional Development in the Western Balkans, Academy of Science of Albania, March 31, 2023- Tirana, Albania. (accepted).
2. Fatlume Zhujani, Georgi Todorov and Konstantin Kamberov, (2023), Single Objective Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Turning of Inconel 718 Using Taguchi Approach, ICRETS 2023: International Conference on Research in Engineering, Technology and Science, The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM) ISSN: 2602-3199. (accepted).
3. Nexhat Qehaja, Fitore Abdullahu*, Fatlume Zhujani, (2018), Mathematical model determination for surface roughness during cnc end milling operation on 42CRMO4 hardened steel, International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 9(1), 624-632.
4. Nexhat Qehaja, Fitore Abdullahu and Fatlume Zhujani, (2018), Predictive mathematical modeling of tool life based on cutting parameters and workpiece material hardness using regression analysis, International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 8(8), 1229-1237.
5. Nexhat Qehaja, Azem Kyçyku and Fatlume Zhujani, (2017), Tool wear modeling of hardened 42CrMo4 steel depending on cutting parameters and workpiece material hardness during turning process, Journal ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, 15 (4), 117-122.
6. Fatlume Zhujani**,** Nexhat Qehaja, Fitore Abdullahu* and Mirlind Bruçi, (2016), Mathematical modelling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters in drilling process, 27th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation DAAAM.
7. Qehaja Nexhat., Abdullahu Fitore, and Zhujani Fatlume, (2017), Predictive mathematical modeling of tool life based on cutting parameters and workpiece material hardness using regression, International Journal of Mechanical Engineering and Technology.
8. Nexhat Qehaja, Ilir Doçi*, Mirlind Bruçi, Fitore Abdullahu, Kaltrinë Jakupi and Fatlume Zhujani, (2016), 27th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation DAAAM.
9. Nexhat Qehaja, Ilir Doçi*, Mirlind Bruçi, Fitore Abdullahu, Kaltrinë Jakupi and Fatlume Zhujani, (2016), 27th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation DAAAM.

B) Web of Science

1. Fatlume Zhujani, Georgi Todorov and Konstantin Kamberov and Fitore Abdullahu, (2023), Mathematical Modelling and Optimization of Machining Parameters in CNC Turning Process of Inconel 718 Using Taguchi Method, --Manuscript Draft-- Journal of Engineering Research. (accepted).

АНОТАЦИЯ

Докторската дисертация се фокусира върху обработваемостта на супер сплавта Inconel 718, най-разпространената супер сплав на базата на никел, която се използва широко в космическата, автомобилната и енергийната промишленост поради изключителните си термомеханични свойства. Освен това е пословично труден за рязане материал поради краткия живот на инструмента и ниската производителност на обработка. Въпреки значителния напредък в технологията на режещите инструменти, обработката на Inconel 718 остава основна трудност.

В резултат на това бяха проведени обширни изследвания, които включват кинематика и фактори, влияещи върху процеса на струговане, теоретични модели на грапавост на повърхността, износване на инструмента и живот на инструмента, както и стратегии за моделиране и оптимизиране в процесите на струговане.

Основната цел на техниките за машинна обработка е да произвеждат висококачествени стоки с ниска цена. В резултат на това икономиката на машинната обработка е важен аспект за постигането на такава цел.

За да се произвеждат възможно най-добрите артикули, е изключително важно да се изберат подходящите условия на обработка, като скорост на рязане, скорост на подаване и дълбочина на рязане.

Проблемът с икономиката на обработката включва избор на най-добрите параметри на рязане, за да се максимизира или минимизира дадена целева функция. Максимизиране на нормата на печалба, минимизиране на единичните производствени разходи, максимизиране на производствената норма и т.н. са примери за общи целеви функции за оптимизиране на параметрите на рязане.

Проблемът с икономиката на машинната обработка включва избор на подходящи параметри на рязане за максимизиране или минимизиране на целева функция. Примери за често срещани целеви функции за оптимизиране на параметрите на рязане включват максимизиране на нормата на печалба, минимизиране на единичните производствени разходи, максимизиране на скоростта на производство и т.н.

За да се постигнат тези икономически цели, проблемът се решава чрез проектиране и провеждане на експериментално изследване, както и чрез избор на методи за математическо моделиране и оптимизиране на процеса, които водят до оптимална комбинация от параметри на процеса, както и тяхната корелация с характеристиките на изходните реакции.

В допълнение към експерименталната работа, техниката Taguchi, методологията на повърхността на реакцията (RSM) и анализът на дисперсията бяха използвани за оптимизиране и математическо моделиране на отговорите на обработваемостта. Изградени са множество линейни модели от първи ред, за да се съпоставят реакциите (грапавост на повърхността, износване на страните и живот на инструмента) и параметрите на обработка.

Анализът на дисперсията беше използван за изследване на ефекта от параметрите на рязане върху отговорите на обработката. Оптимизаторът на отговорите на Minitab-18 оптимизира многобройни отговори, използвайки функциите за желателност Ramin, VBmin и TLmax. Оптимизаторът на отговорите на Minitab-18 оптимизира многобройни отговори, използвайки функциите за желателност Ramin, VBmin и TLmax.

В резултат на това разработените линейни математически модели от първи ред позволяват анализ на отговорите на обработката, включително параметър за грапавост на повърхността (Ra), параметър за износване на страните на инструмента (VB) и живот на инструмента (TL). Те позволяват моделиране и оптимизиране на всяка характеристика на реакция поотделно или едновременно, числено или графично, и са подходящи за използване както в серийни, така и в масови производствени процеси на рязане.

TECHNICAL UNIVERSITY - SOFIA
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGIES
Department “Manufacturing Technologies
and Machine Tools”

MSc. Eng. Fatlume Zhujani

EXPERIMENTAL RESEARCH OF MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF INCONEL 718 IN CNC TURNING PROCESS

A B S T R A C T

of a dissertation thesis for a scientific degree
“Doctor”

Professional field: 5.1 “Mechanical Engineering“
Doctoral programme: «Computer Added Design and AutomationSystems»

Supervisors: Prof. DSc Eng. Georgi Dimitrov Todorov, PhD
Assoc. prof. PhD Eng. Konstantin Hristov Kamberov

Sofia
2023

The Dissertation Thesis was discussed and confirmed for public presentation by the Department of Manufacturing Technologies and Machine Tools, Faculty of Industrial Engineering at TU-Sofia, by voting at a meeting of the Department Council, held on 26.06.2023.

The Candidate is a PhD student at the Technical University of Sofia.

The Dissertation's research activities have been carried out in the "SAALSS", Prizren, Kosovo.

The numbering of the formulas, figures, tables and used literature in the abstract correspond to those in the full text dissertation.

The Dissertation Thesis Book has a total volume of 135 pages, containing 92 figures, 21 tables, and a list of the 114 sources used.

The public presentation of the dissertation will take place on 05.10.2023 at 13:00 p.m. in the conference room of the LIC of the Technical University of Sofia at a meeting of a Scientific Jury composed of:

Prof. DSc. Ivo Krastev Malakov
Assoc. Prof. PhD Yavor Petrov Sofronov
Prof. DSc. Venelin Stoyanov Jivkov, corr. Member of BAS
Prof. PhD. Nina Yankova Penkova
Prof. PhD Eng. Dimitar Nedelchev Karastoyanov

The Dissertation Thesis and connected Documents are available to those interested in the office 3230, FIT, Bl.3, Technical University of Sofia.

Author: **Fatlume Zhujani**

Thesis Title: **EXPERIMENTAL RESEARCH OF MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF INCONEL 718 IN CNC TURNING PROCESS**

Edition: 30 pcs.
Publisher: TU Sofia Press Center

ACKNOWLEDGMENTS:

The author expresses special thanks to:

Prof. DSc Georgi Todorov and assoc prof. Dr. Konstantin Kamberov., my guides and supervisors, who gave me the opportunity to work in the field of Inconel 718 alloy processing, constant encouragement and fruitful discussions for the production of the thesis.

Finally, I would like to make an affectionate acknowledgement to all my family members, especially my husband Artan Halili for her endless support and encouragement and as well as my loving son Teon, for their forbearance and understanding.

I. GENERAL CHARACTERISTICS OF THE WORK

State of the art

Super-alloy Inconel 718 is a state-of-the-art technical material for manufacturing engineering due to its outstanding corrosion resistance, exceptional toughness and high yield strength at high temperatures. This alloy is commonly used in the construction of jet engines, nuclear reactors and turbine engines. It has a number of distinctive qualities, including a lower thermal conductivity, good strength and superior mechanical properties, but is very challenging to machine due to the production of high cutting heat, low surface quality, heavy tool wear which results in short tool life and low productivity in machining process.

Cutting processes, as usual, are addressed in terms of their influence on cutting forces and power, cutting temperatures, lubrication, surface quality, and tool wear and life. Further, to summarize the state-of-the-art, this study presents an analytical and graphical review regarding the investigation of the surface roughness, tool wear and tool life performance in relation to the main production parameters of the machining processes.

Scientific actuality

From the beginning, the machining processes that have been used in industry have faced the challenge of finding an essential technology to create an engineering foundation for determining the appropriate machining parameters in order to achieve high predictability and productivity during the application of processing process in practice. These challenges are overcome with research and development of empirical methodology, scientific (predictive) methodology and computer-based technology for assessment of reasonable economic machining.

For these reasons, most researchers use mainly empirical data analysis based on regression technique, which is a powerful tool for modeling and analyzing real processes, the nature and behavior of which cannot be explained using a theoretical approach. Many studies have shown that the success of a regression analysis depends on the choice of the appropriate form of mathematical models, and that the exponential form ensures the most appropriate and effective approximation of the experimental data. The Surface Response Methodology (RSM) mainly uses the statistical regression method because it is practical, economical and relatively easy to use. It statistically analyzes experimental data planned to reach valid and objective conclusions.

A scientifically disciplined system known as the Taguchi method is used to assess and put into practice advances in goods, procedures, resources, tools, and facilities. By analyzing the main factors influencing the process and optimizing the practices or designs to provide the best outcomes, these enhancements strive to enhance the desired qualities while concurrently minimizing the amount of errors.

Practical applicability

The study of tool wear behavior of cutting tools traditionally relies on extensive experimental procedures that require time and money. From the studies obtained in this thesis, the determination of the time for the consumption of a limiting device is estimated based on the total number of passes by the extrapolation of the consumption-time curves significantly reduces these costs. The linear mathematical models developed in the investigation enable the analysis of processing responses, including Ra, VB and TL. They allow modeling and optimization of each response separately or simultaneously, numerically or graphically, and are suitable for use in both serial and mass production cutting processes.

Thesis work release

Dissertation research was carried out at the "SAALS Industry" Prizren, and in the laboratory of Faculty of Mechanical Engineering at the University of Pristina

Thesis work conformation

The dissertation work has been reported to the Department of Manufacturing Technology and Machine Tools, FIT, TU-Sofia.

Publication of thesis results

The substantive results of the Dissertation Thesis have been accepted in 3 papers, referenced inSCOPUS and Web of Science.

II. CONTENT OF DISSERATION

1. Introduction

1.1 Research objectives

The primary objective of this study is modeling and developing offline predictive mathematical models that relate surface roughness, tool wear, and tool life to three cutting parameters in the turning process: cutting speed (v), feed rate (f), and depth of cut (d). The first-order linear regression predictive models of surface roughness, tool wear and tool life that best fit the established criteria will be develop using Response Surface Methodology (RSM) and analysis of variance (ANOVA). The secondary objective is to optimize the machining parameters that will produce the best machining response during the turning of Inconel 718 alloys with coated WC-Co inserts in dry conditions. The third objective is graphically optimization of linear regression models which allows visual selection of the optimum machining conditions according to certain criterion.

1.2 Research scope and focus.

This research covers the machinability of Inconel 718, which is considered a difficult to cut material, not only because of its superior material properties, but also because of its poor thermal conductivity, which can lead to premature tool wear tools and poor finish of the final product. In this regard, it is of great importance to optimize the processing parameters, to strengthen the performance results of the process in relation to the quality and cost of the product.

The research has focused on developing suitable mathematical models in a systematic way, scientific and reliable way, that integrate experimental, analytical and numerical knowledge in the field of production process planning and optimization of response characteristics of process as surface roughness, tool wear and tool life. These models provide sufficient technological data to ensure the efficient use of machine tools and personnel. The rapid use of computer-aided manufacturing (CAM) in the machining process through the use of CNC and DNC machine tools has concentrated on the importance of creating trustworthy machining data systems to ensure optimum productivity from the pricey machinery involved.

1.3 Research challenges and objectives

Despite a significant advance of traditional cutting tool technologies, however, the machining of the Inconel 718 super alloy is considered a major challenge due to the intrinsic characteristics of those Ni-based super alloys, the machining of which promotes high levels of tool wear of coated inserts used respectively a short tool life.

Therefore, the aim of research aim selection of the appropriate cutting tools and the machining parameters as cutting speed, feed rate and depth of cut, play an important role in the efficient utilization of machine tools and thus significantly influences the overall manufacturing costs

1.4 Research methodology

In this study, a systematic research plan will be developed that will provide the data and results needed to test the hypothesis. To obtain this information it is necessary to implement experimental work in laboratory conditions where it is necessary to produce data that will be suitable for testing certain characteristics and thus obtain basic input information for subsequent processing and analysis and drawing conclusions.

The machining material will be Inconel 718 super alloy, which is typically used for jet engine and gas turbine operations. In experimental research, the Taguchi method Design of Experiments (DOE) will be applied with the measurement, processing and systematization of results. Regression analysis of the results will lead to predictive empirical mathematical models that describe the dependences of selected output characteristics on machining parameters. Robust Taguchi design will be used in the optimization process, which provides the best combination of cutting parameters that can lead the optimal machining response.

The Thesis Work is divided into seven chapters.

Chapter 1 presents developments towards machining of Inconel 718 together with a description of the research objectives, subject and methodology of the study.

Chapter 2 provides an overview of previous research and theoretical considerations in the literature, including kinematics and factors affecting the turning process, theoretical (geometric) models of surface roughness, tool wear and tool life, as well as modeling and optimization techniques in turning processes.

Chapter 3 offers an overview of the design of experimental methods (DOE) as well as a

thorough explanation of Taguchi's method design of experiment.
Chapter 4 elaborates on the methodology of turning Inconel 718 alloy, as well as the testing methods used to measure surface roughness, tool wear, and tool life.
Chapter 5 introduces experimental data processing and analysis, development of predictive mathematical models, statistical analysis, and optimization of machinability responses by selecting the best levels combination of cutting parameters.
Chapter 6 describes the graphical optimization and evaluation of the first-order linear regression models trough 2D-contour plots and 3D-surface plots.
Chapter 7 contains the thesis's conclusions, scientific contribution, scientific/applied, applied contributions as well a proposal for future research on the topic.

2 LITERATURE REVIEW

2.1 Chapter overview

This chapter provides definitions and information regarding the anticipated doctoral thesis project. The chapter's purpose is to first review the scientific literature and methodological principles pertaining to the topics and issues discussed in this study, and then to develop a theoretical framework for the proposed research. The concept, data, and information are gathered from a variety of sources in order to comprehend the concept and knowledge or data useful to the project.

2.3 Surface roughness

The geometry of the workpiece and the micro geometry of the machined surface make up the quality of the machined surface. The geometry of the workpiece is determined by the accuracy of measurements, shape and mutual position of two or more surfaces of the workpiece. The micro geometry of the machined surface is determined by the roughness of the machined surface. Surface roughness refers to a series of microscopic geometric features of small valleys and peaks of varying spacing and height that are usually placed in a non – deterministic manner on a machined surface. Diagram of surface finishing, Figure 2.5 shows surface roughness parameters Ra, where Ra is defined as the average variation of the roughness profile from the center line (m).

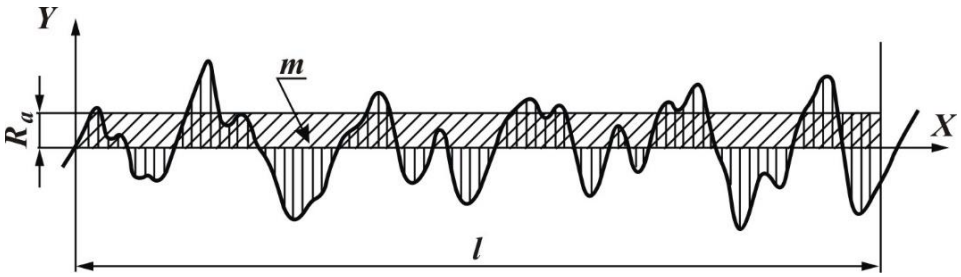


Figure 2.5 Arithmetical Average Roughness, Ra – diagram

As seen in Figure 2.5, according to JIS B 0601 [18] (1994), the Ra value is lower than the actual height of the roughness variations, due to this averaging derived from (Eq. 2.6). The approximate value of the mean arithmetic deviation of the Ra profile is:

$$R_a \approx \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i| \quad (2.7)$$

2.4 Tool wear and tool life models

The ability to predict and modeling tool wear and expected tool life in metal cutting is great importance to ensure robust, predictable and stabile machining systems. Tool manufacturers use tool life models to help end users with optimal cutting data published in online catalogs or online web applications. Depending on the needs of the tool user, the production process can be optimized either for maximum productivity or to achieve the lowest production costs. Tool life behavior, according by Clocke F. [9] (2011) is the ability of a working pair (tool and workpiece) to withstand a certain cutting process. This is affected by the durability of the cutting edge of the tool, the machinability of the workpiece and by tool life conditions, Fig. (2.7).

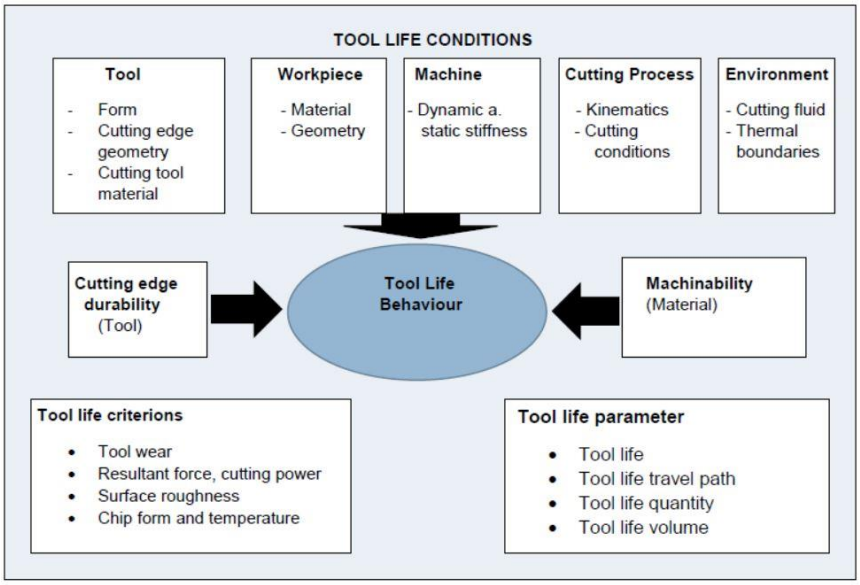


Figure 2.7 Tool life behaviour, by Clocke F. [9] (2011)

For a tool life criterion of 0.3 mm flank wear, hypothetical speed and tool life values are displayed in Figure 2.8. Further research became necessary after him to make the equation of tool life practically useful in a wide field of application. Kronenberg M. [37] (1927) was exert the greatest influence on this research.

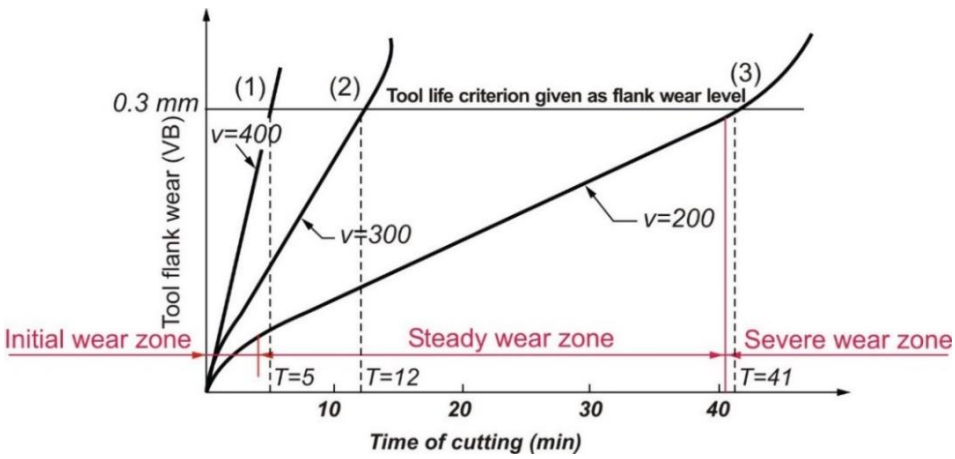


Figure 2.8 Effect of cutting speed - v on tool flank wear - VB for three cutting speeds [36]

The well-known Taylor equation, discovered around 1900, as well as its later transformations describe the relationships between tool life and machining parameters and include several constants for different combinations tools and workpiece materials.

$$v \cdot T^{m} = C_{T} \tag{2.12}$$

where; v - cutting speed (m/min), TL - tool life (min), m - an exponent depending on work material, tool material, tool geometry and cutting fluid.C_T - a constant representing the cutting speed that results in 1 min tool life. Sheng J. [39] (2015) in his study consider that cutting tool wear occurs on the front (Crater wear) and on the back (flank wear) in contact with chips and workpieces. In most cases, they occur simultaneously and interact with each other, according to Waluyo et. al. [40] 2020, Fig. (2.9).

2.6 Mathematical modeling of machinability functions

The purpose of complex methods is to obtain mathematical models of the machining process, i.e. to obtain machinability functions. Machinability functions are mathematical models by which describes the interdependence of input and output parameters of the machining process and represents an approximation of the actual shape of the process function.Mathematical models of

metal cutting should be able to offer the following information, according to Trent and Wright [72] (2000):1) Prediction of tool life, TL=TL(X_i), 2) Prediction of the quality of machined surface R=R(X_i). 3) Prediction of chip control, C=C(X_i), 4) Prediction of the loads on the tool F=F ((X_i), the workpiece and the fixtures, 5) Prediction of the accuracy of the components being machined.

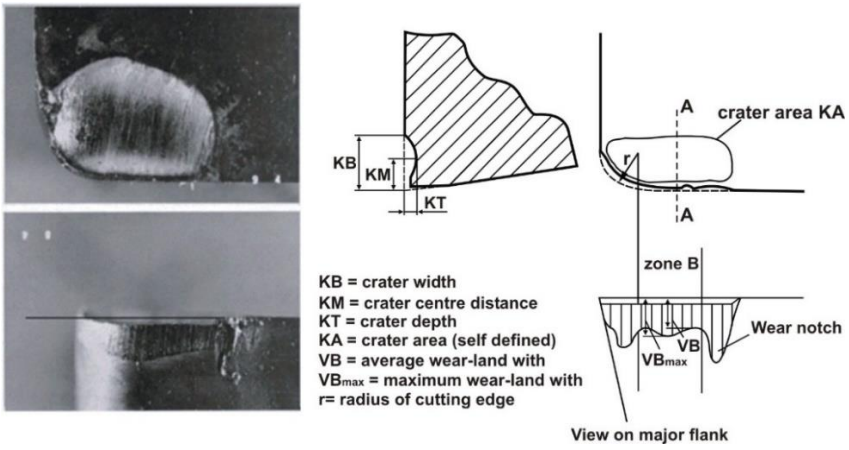


Figure 2.9 Schematic representation of worn cutting tool

2.6.1 Mathematical models

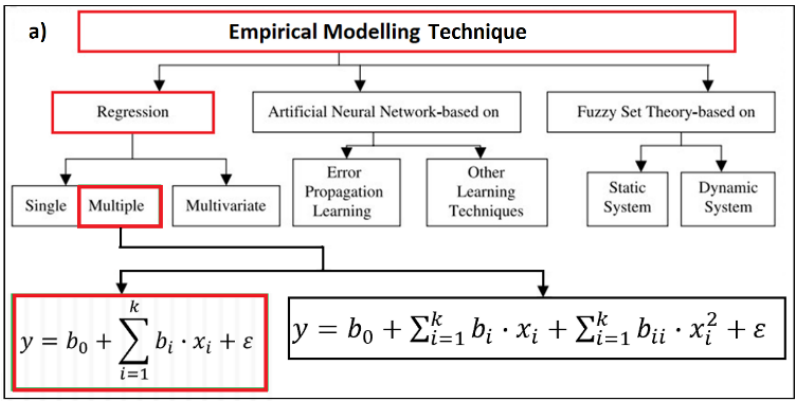
Linear models are the most basic and hence frequently employed. By using the proper transformations and nonlinear models, a huge number are reduced to this model. The polynomial equation is the most often utilized of the linear models. Any degree of polynomial function can be used as an empirical mathematical model. According to Sarabia and Ortiz [76] (2006), the majority of experimental research using cutting processes as mathematical models fulfill first-degree models as follows:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i \cdot x_i + \varepsilon \quad (2.21)$$

This model is a multiple linear regression with p=k+1 coefficients and k independent variables.

2.7 Modeling and optimization technique

The modeling and optimization strategies in metal cutting processes are reviewed in Mukherjee and Ray's publication [83] (2006) with a focus on (a) modeling techniques and (b) optimization techniques, including standard and unconventional (evolutionary) optimization techniques as shown in Figure 2.11. This study also made clear that modeling and optimization techniques have been used in recent studies due to the difficulty in determining the best machining parameters using a mathematical model.



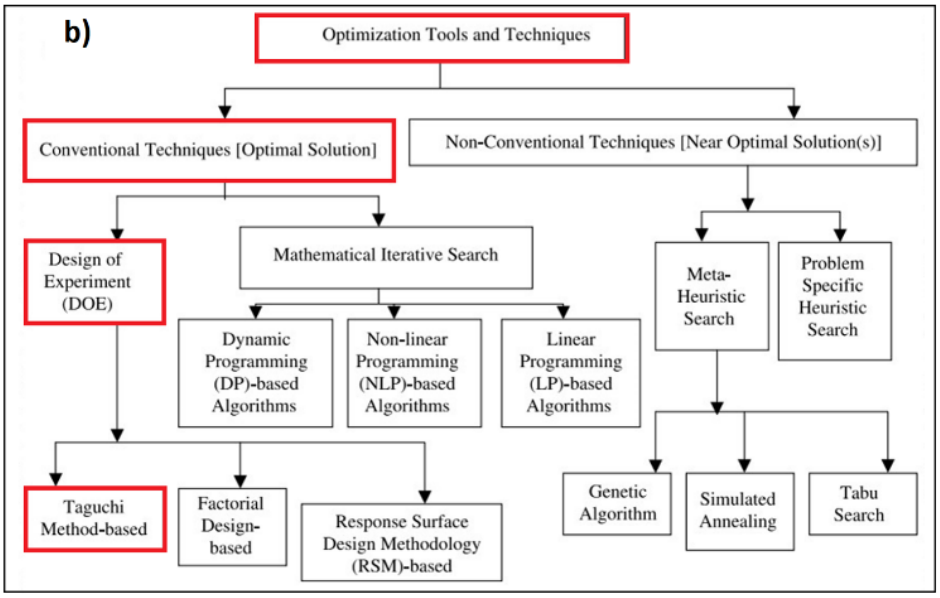


Figure 2.11 Classification of modelling (a) and optimization (b) techniques in metal cutting process

2.8 Conclusions

- From this review of the contemporary literature, it has been reached to compile the motivation and lay out the objectives of this research and theses of this PhD study.
- Additionally, this review has provided sufficient scientific information to determine the selection of theoretical and experimental research methodology, statistical methods of analysis and confirmation of results, methodology of modeling and optimization of machinability functions, selection of measurement techniques, suitable processing, type and quality of cutting tools, etc., which are explored in detail in the following chapters.

2.9 Motivation

Despite significant progress in cutting tool technologies, the machining of Inconel 718 is still considered a grand challenge. Based on the challenges listed above, this research was motivated by the need to contribute to the machinability study of the Inconel 718 super alloy in order to obtain predictive mathematical models and determine the optimal levels of machining parameters to give the best results for response characteristics i.e. surface roughness, tool wear and tool life.

2.10 The thesis goal

The goal of this research is, in a systematic, scientific and reliable way, to develop predictive empirical mathematical models that integrate experimental, numerical and analytical knowledge in the field of planning and optimization of the production process.

Furthermore, the research will enable the formation of a knowledge base, which, with the installation of appropriate sensors, is necessary to obtain an intelligent processing system.

RESEARCH TASKS

To fulfill of the goal of the dissertation thesis, the following primary tasks are specified:

- Conducting experimental tests in the dry turning process using the Taguchi orthogonal array.
- Performing statistical analyzes using signal-to-noise ratio (S/N) and analysis of variance (ANOVA) methodologies.
- Investigating the influence of cutting parameters such as cutting speed, feed rate and depth of cut on machining responses.
- Analyzing the surface roughness by measuring the average surface roughness (Ra).
- Evaluation of tool flank wear degradation (VB).
- Tool life (TL) testing by measuring the critical value of tool flank wear (VB).
- Conducting confirmatory experimental tests optimal results.

3. DESIGN OF EXPERIMENTS BASED ON TAGUCHI'S METHOD

3.1 Chapter Overview

In this chapter, the definitions and basic principles of experiment design will be presented, such as planning, conducting and analyzing an experiment in general, while the Taguchi method will be explored in detail. The primary objective of Design of Experiments (DOE) is to establish optimal process performance by determining the optimal levels of process input variables.

3.4 Taguchi method design of experiment

The Taguchi method of design of experiments is a simple statistical tool involving a system of orthogonal arrays that allows a maximum number of main effects to be estimated in an unbiased fashion with a minimum number of experimental runs. It has been applied to predict the significant contribution of the design of variables and the optimum combination of each variable by conducting experiments on a real-time basis. The experiments are performed in a way to determine the range of variability resulting from the variation of controlled factors and uncontrolled factors (noise), by Roy R. [93] (2010).

3.4.2 Robust-Design of experiments

According to Phadke M. [99] 2012, the Taguchi Method, also known as robust design, is an engineering process for enhancing productivity during research and development so that high-quality goods can be created rapidly and at a cheap cost.

The Taguchis approach of quality engineering takes into account all phases of product or process development, but parameter design is crucial for obtaining high quality and cheap cost. Optimal levels of process parameters (elements) are chosen through parameter design such that the influence of uncontrollable factors has the least possible impact on system performance. Five main tools make up the Robustness Strategy, according to Phadke M. [99] (2012).

1. A P-Diagram is used to categorize a product's variables into noise, control, signal (input), and response (output) elements, as shown in figure 3.1.
2. The ideal form of the signal to response relationship as contained by the design concept for making the high level system operate flawlessly is specified mathematically using the ideal function.
3. To calculate the amount of loss a user incurs as a result of deviating from the desired performance, one uses the quadratic loss function, also known as the quality loss function.
4. Through laboratory tests, the Signal-to-Noise Ratio (index) is used to forecast the field quality.
5. With a limited number of tests, orthogonal arrays are utilized to acquire trustworthy data regarding control factors (design parameters).

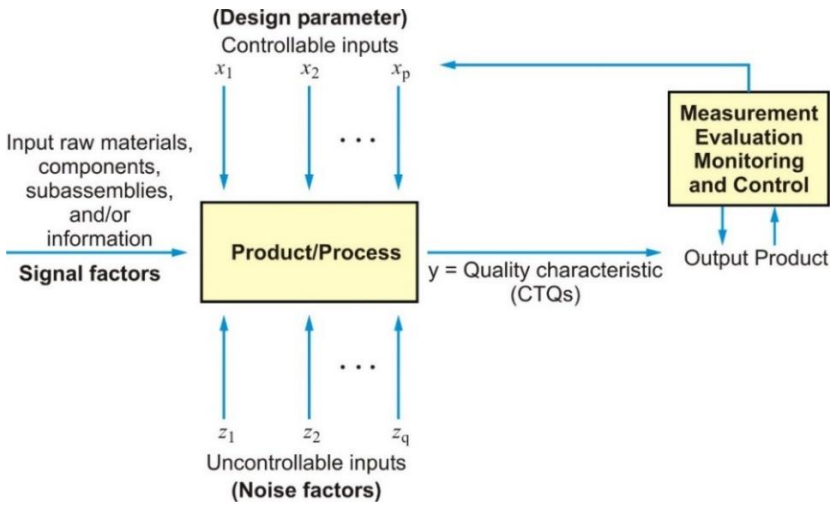


Figure 3.1 P-Diagram of product or process, by Montgomery D. [130] (2009)

Taguchi advocates examining the mean answer for each run in the inner array as well as

examining variation using a signal-to-noise ratio (STN) that has been carefully selected.

- Main response:

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \quad (3.2)$$

- Standard deviation:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (3.3)$$

Additionally, the use of signal-to-noise ratio (STN) as a performance measurement statistic is one of the many criticisms of Taguchi's approach. STN reports have come under fire for occasionally producing false results. Although the Taguchi technique is less popular than classical experimental design, it offers the practical engineer a helpful place to start when looking to enhance quality. The key reason for this is that the first is mostly focused on quality engineering factors while the second is primarily focused on statistical aspects. The benefit of Taguchi's approach is that it incorporates statistical techniques into a solid engineering procedure.

According to Kamal et al. [103] (2012), there are three common forms of signal-to-noise (STN) ratios of interest for optimizing static problems:

- Smaller the better (for making the system response as small as possible):

$$SN_s = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \quad (3.4)$$

- Nominal the best (for reducing variability around a target):

$$SN_T = 10\log\left(\frac{\bar{y}^2}{S^2}\right) \quad (3.5)$$

- Larger the better (for making the system response as large as possible):

$$SN_L = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (3.6)$$

The ideal factor levels are those that maximize the required signal to noise (STN) ratio after analyzing the signal to noise (STN) ratio to establish the preferable parameter values. Once all of the STN ratios have been computed for each run of an experiment, Taguchi recommended a graphical approach to analyze the data. In the graphical approach, the STN ratios and average responses are plotted for each factor against each of its levels. The graphs are then examined to 'pick the winner,' i.e., pick the factor level which (i) best maximize SN and (ii) bring the mean on target (or maximize or minimize the mean, as the case may be).

3.4.3 Taguchi approach to the experiment design

Robust design means finding the optimal control factors settings to make a product or process insensitive to noise factors. The steps to be followed to achieve a Taguchi's robust design are listed in Figure 3.2. according to Phadke M. [104] (1989) & Tapan B. [105] (1993). According to steps that are involved in Taguchi's Method, a series of experiments are to be conducted. Below is the case study of the doctoral thesis for the optimization of the cutting process parameters of the alloy material Inconel 718 on CNC turning machine. The procedure is given below:

Step 1. Identification of Main Function, Objective and Quality Characteristics

- Main function: Machining of Inconel 718 Alloys in CNC turning machine
- Objective and results: Determining the best settings of process parameters to optimize the responses of process.
- Quality characteristics: Direct measurement of response for the present investigation surface roughness, tool wear and tool life.

Step 2. Determining system parameters (control factors, noise factors, machine parameters)

- Control Factors: Cutting speed, feed rate and depth of cut.
- Noise Factors: Vibrations, temperature variations, operator skill, machine-tool and tool condition, material variations).

Step 3. Identifying the objective function to be optimized

The target of a process may be a minimum, nominal or maximum. In this case is selected:

Objective function: Smaller the better STN Ratio for this function (Eq.3.4), for surface roughness and tool wear. Objective function: Larger the better STN Ratio for this function (Eq.3.6), for tool life.

Step 4. Defining the control factors levels

Based on the researched literature on the machinability of Inconel 718 alloy and the carbide cutting tool inserts used CCMT09T308N-SU grade AC5005S coated with PVD ultra multi-layer thin layer AlTiSiN, the three machining parameters (control factors) considered in this study are: cutting speed, feed rate, depth of cut. All of them were set at three different levels (see Table 3.1).

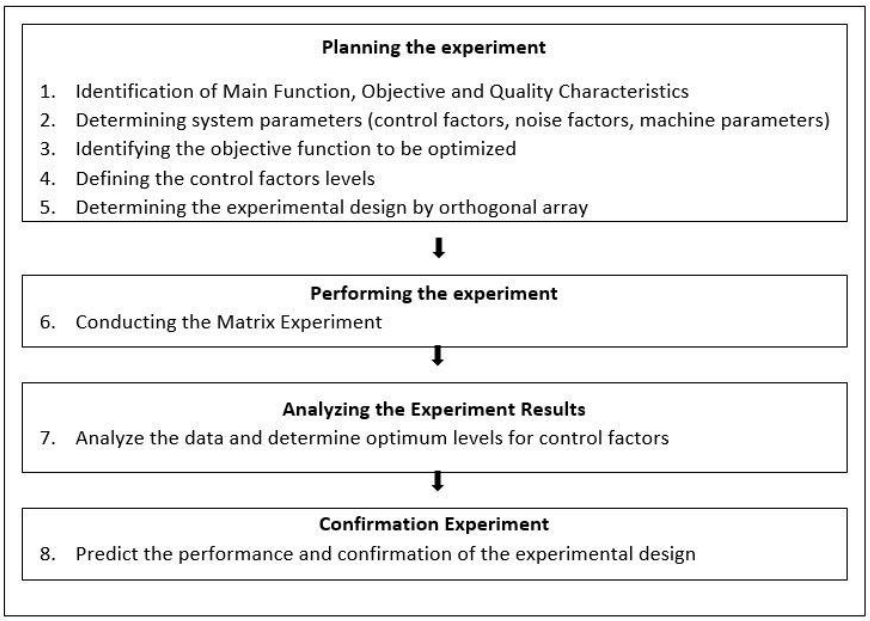


Figure 3.2 Taguchi's approach to process optimization

Table 3.1: Control factors and their level

Factors	Cutting speed (v)	Feed rate (f)	Depth of cut (d)
Level 1	100	0.071	0.2
Level 2	120	0.092	0.4
Level 3	140	0.125	0.6

Step 5. Determining the experimental design by orthogonal array

The development of the orthogonal array is credited to Englishman Sir R. A. Fisher. His initial attempts at using orthogonal arrays were made to manage experimentation mistake. Since then, as stated by Roy R. [93] (2010), Taguchi has modified the orthogonal array to assess not only the effect of a factor under study on the average result, but also to determine the variance from the average result. An orthogonal array is a set of numbers with columns that are parallel to one another, meaning that all ordered pairs of numbers appear in each pair of columns the same number of times at both the lowest and highest levels.

Step 5.1 Design of the matrix experiment of orthogonal arrays

A standard table of Taguchi orthogonal array is shown in (Figure 3.2), which is used to study the entire parametric space with a limited number of experiments. Before one attempts to select an orthogonal array (OA) to lead design optimization experiments, it needs to first identify the key factors should be studied in the process, number of levels which are possible for each factor, two interactions between factors and special difficulties in running experiments should be investigated. Orthogonal arrays are a special standard experimental design that requires a small number of experimental trials to find the main effect of the factor on the output. For selecting an orthogonal array, the minimum number of experiments (tests) to be conducted shall be fixed which is given by: Raj T. [107] (2011).

$N_{Taguchi} = 1 + NV (NL-1)$ (3.7)

where; $N_{Taguchi}$ – number of experiments to be conducted, NV – number of variables (factors), NL – number of levels, Number '1'- In counting the total Degrees of Freedom (DF), the researcher assigns '1' DF to the overall response average in the study. This starts counting the DF as 1., according to Tapan P. [105] (1993). In this thesis study case for dry turning of Inconel 718 alloys are selected three variables at three levels (Table 4.1), i.e., NV = 3 and L = 3, therefore the minimum number of the experiments to be conducted will be:

$N_{Taguchi} = 1+3(3-1) = 7$, minimum runs (3.8)

Orthogonal array should be selected, in such a way that the total number of experimental runs in main experiment should be greater than the total DF (Eq. 4.8) of the experiment. Hence at least 7-experiments are to be conducted. Based on this orthogonal array (OA) is to be selected he which has at least 7 rows i.e., experimental runs. Taguchi identified several basic Orthogonal Arrays which he called 'standard OAs': $L_4(2^3)$, L_8 (2^7), L9 (3^4) L12 (2^{11}), L15 (4^5), $L16(2^{15})$ $L'16(2^{15})$, L_{27} (3^{13}) etc., listed in table 3.2., according to Tapan B. [105] (1993). Therefore, the first orthogonal array that can be selected is L_9 (3^3). In this doctoral thesis study L9 $(3^{3)}$ is sufficient.

Table 3.3 Experimental matrix layout using an L9 orthogonal array

Exp. No.	Cutting speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

3.5 Conclusions

- The Taguchi method defines "optimization" as determining the best levels of control factors at which the signal-to-noise ratio is maximized.
- The experiments used to determine the best levels are based on Orthogonal Arrays, which are balanced in terms of all control factors while being small in number.
- As a result, the resources (materials and time) needed for the tests are similarly minimal.
- The Taguchi approach as process optimization method is based on eight processes of planning, conducting, and analyzing matrix experiment data to discover the optimal levels of control parameters.
- The main goal is on maintaining a small output variance despite the presence of noisy inputs, which makes the process robust i.e. resistant to all variations.

4 EXPERIMENTAL METHODOLOGY

4.1 Chapter Overview

The objective of this chapter is to provide the necessary experimental information about the machine tools, measuring devices, workpiece material, cutting tools and machining parameter values and levels, and as well protocol used in this study.

4.2 Machinability assessment and measurement protocol

For the experimentation of the machinability assessment of workpiece material Inconel718 alloy the machine tool and equipment's, instruments, cutting tools and their parameters are explained in the following subsections.

4.2.1.1 Machine tool

The experiments were conducted under dry cutting conditions on machine CNC lathe GOODWAY, Type GLS-200 M Figure 4.1, with the following specifications:

- Bar Capacity: 51 mm
- Power: 7.5 kW
- Turning Dia: 280 mm
- Swing: 500 mm
- Machining Length: 340 mm
- Max Speed: 4200 rpm
- Control CNC

Figure 4.1 CNC Lathe Machine GLS-200 M

4.2.1.2 Cutting Inserts

In this research, carbide tool inserts as per ISO specification CCMT09T308N-SU Sumitomo grade AC5005S coated with PVD ultra multi-layer thin layer AlTiSiN process are used for the finish turning tests of the Inconel 718 alloy. The inserts are rigidly attached to a toolholder SCLCR 2020 K89, Figure 4.2.

a) b)

Figure 4. 2. a) Toolholder SCLCR 2020 K89 – Techno Takim, b) Cutting insert CCMT 09T308N

4.2.1.3 Surface roughness measurement apparatus

The Mitutoyo SJ-310 surface roughness testing device was used in the research to measure the arithmetic mean of the profile deviations (Ra). Figure 4.3 shows the tester used for experimentation. Table 4.1 shows the general specifications of the surface hardness tester used during the experiment.

All roughness values were measured three times and only average values are calculated to minimize experimental errors.

Table 4.1 General specifications of the surface hardness tester

Measuring speed	0.25, 0.50, and 75 mm/s
Returning speed	1 mm/s
Evaluation length	12.5 mm
Detector type	Differential inductance
Skid force	0.75 mN
Roughness standard	JIS, DIN, ISO, ANSI
Sampling length	0.25mm, 0.8mm and 2.5mm
Display range	0.01-100 µ

Figure 4. 3 Surface roughness measurements with Mitutoyo SJ-310

4.2.1.4 Optical microscope

Tool wear measurement was performed on a Carl Zeiss cutting tool optical microscope with 15 x 8 magnification, which enables movement along three axes Figure 4.4. An AmScope MU1403B digital camera equipped with Windows software is mounted on the optical microscope, enabling image development, measurement, editing and storage.

4.2.2 Workpiece Material

The workpiece material used as test specimen is Inconel 718 alloy hot treated, a round bar of test specimen ∅63.5mm diameter and 500mm length is used for the cutting turning tests. The Inconel 718 ally is United Kingdom-made and material is certified by Special Metals Wiggin Limited, with certificate of inspection No. 433803 v 1, 28 Aug 2020, according to standard EN 10204-3.1/ISO 9001/EN/AS/JISQ 9100, presented in Appendix F. The chemical compositions by percentage of weight basis and mechanical properties of Inconel 718 ally are given in Table 4.2 and 4.3 respectively.

Table 4.1 Chemical composition of Inconel 718

C	Si	Mn	Al	Co	Cr	Fe	Mo	Nb	Ni	Ti	Se
0.03	0.06	0.07	0.49	0.25	19.3	17.3	3.3	5.28	52.9	0.96	≤3

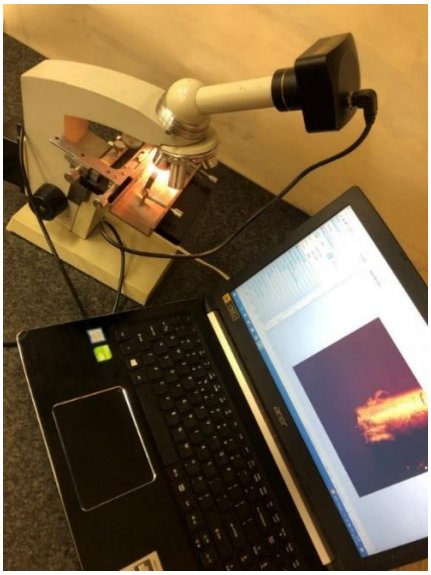


Figure 4.4 Carl Zeiss optical microscope with digital camera AmScope MU1403B 14MP

Table 4.2 Mechanical properties of Inconel 718

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Young modulus (MPa)	Density (kg/m^3)	Melting point(˚C)	Hardness (HBW)	Hardness after heat treated (HBW)	Thermal conductivity (W/mK)
1197	1248	205×10^3	819	1290	245	411	11.20

4.2.3 Determination of machining parameters and their Levels

The theoretical knowledge presented in the third chapter explains the functional connection of input, independently variable quantities with output, dependently variable quantities of particle separation processing procedures.

On the basis of these findings, the input sizes were selected which will satisfactorily describe the responses or output values of the researched machining procedure. One of the main tasks of machine tools is to enable the execution of machining operations with the required rigidity, to take over the vibrations generated during machining and to ensure the necessary machining power. All of the above depends on workpiece material, on the geometry and material of the cutting tool, and on the applied machining parameters.

The guidelines for the selection of the processing parameter zones, according to the recommendations of the tool manufacturer and the existing database were not completely satisfactory. Therefore, for the material of the workpiece used in this research and the inserts of the applied cutting tools, were performed extensive preliminary tests, which determined the limit of values of the processing parameters, i.e. the range of the input variables. The previous tests determined the tool wear criteria for the applied cutting plate VB_{max}= 0.3 mm. The factor levels of the machining parameters to be studied and the attribution of the levels are shown in Table 4.3.

Table 4.3 Machining parameters

Cutting parameters	Notation	Unit	Levels		
			1	2	3
Cutting speed	v	m/min	100	120	140
Fed rate	f	mm/rev	0.071	0.092	0.125
Depth of cut	d	mm	0.2	0.4	0.6

Based on the design of the experiments (DOE) Chapter 3, Taguchi's L9 (3^3) Orthogonal array designs is used as it gives a relatively accurate prediction of all the means of the response variables and the same is shown in Table 4.4 and 4.5.

Table 4.4 Coded Experimental matrix layout using an L9 orthogonal array for R_a, VB and TL

Exp. No.	Cutting speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	Ra (µm)	VB(µm)	TL (min)
1	1	1	1	0.23	80	30.44
2	1	2	2	0.30	85	28.25
3	1	3	3	0.32	92	25.91
4	2	1	2	0.24	110	24.53
5	2	2	3	0.28	121	23.35
6	2	3	1	0.31	120	24.12
7	3	1	3	0.20	152	18.41
8	3	2	1	0.23	153	18.18
9	3	3	2	0.28	170	14.8

Table 4.5 Natural experimental matrix layout using an L9 orthogonal array for R_a, VB and TL

Exp. No.	Cutting speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	Ra (µm)	VB (µm)	TL (min)
1	100	0.071	0.2	0.23	80	30.44
2	100	0.092	0.4	0.30	85	28.25
3	100	0.125	0.6	0.32	92	25.91
4	120	0.071	0.4	0.24	110	24.53
5	120	0.092	0.6	0.28	121	23.35
6	120	0.125	0.2	0.31	120	24.12
7	140	0.071	0.6	0.20	152	18.41
8	140	0.092	0.2	0.23	153	18.18
9	140	0.125	0.4	0.28	170	14.8

4.2.4 Experimental Work

To perform the experimental tests on the GOODWAY CNC lathe, the 3D design of the workpiece model was done in SolidWorks CAD software and then through AZ-CAM software was programmed in order to calculate cutting path of tests based on Taguchi's design of experiments, presented in Appendix A.

The experimental tests were carried out based on the Taguchi method according to the standard orthogonal array L9(3^3), Table 3.3, respectively Table 4.5.

4.2.4.1 Surface roughness measurement process

Surface roughness is measured using a portable stylus-type profilometer, Mitutoyo SJ 310. The profilometer was set to a cut-off length of λ_c = 0.8 mm, a 2CR filter, a transverse velocity of 1 mm/s and a transverse length of 4 mm. The surface roughness (Ra) was measured by placing the stylus perpendicular to the feed rate marks on the machined surface towards the end of the cut and the surface roughness measurement values are shown in Tables 4.4 and 4.5, while their respective profiles are shown in Appendix B., Fig B-1 to B-9.

4.2.4.2 Tool wear measurement process

Tool life evaluation involves a series of tests that must be performed under various cutting conditions until the cutting tool fails. This procedure not only consumes a number of tools, but also requires a lot of time and work material, especially during machining process conditions ensuring longer tool life, as reported by Mehrban et al. [40] (2008). In the present work, a methodology was adopted in which the machining process was carried out in 7-8 passes in each cutting condition trial in a length of 125 mm, in a series of nine trials replacing each time a new cutting edge. The first two passes were used to determine the tool flank wear (VB) model, and the obtained results are shown in Tabs. 4.4 respectively 4.5. The flank wear value of cutting insert is measured after each 1-3 passes under a tools optical microscope and the images taken are stored in the Appendix C (Figure C-1 to C-33) ,while the time for a limiting tool wear is estimated based on the total number of passes and from the extrapolation of the wear-time curves according to Eq. (2.22) stored in Appendix D (Figure D-1 to D-9), that's mean that tool life is estimated by fitting a best-fit line on the data falling in the steady

(uniform) wear zone, and then finding the time by which a maximum flank wear of 300 µm would occur, and obtained results are providing in Table 4.6. The criterion of a maximum flank wear of 300 µm is based on literature, as well as, the recommendations of manufacturer.

Table 4.6 Natural experimental matrix layout using an L9 orthogonal array for tool wear and tool life

No	Cutting parameters			Technological parameters		Measurements values					Extrapolation values of TL (min) for VB_{max} = 300 (µm)	
				Dv-Average DIA n - rotation/min.	Order of measurement	1	2	3	4		TL = (VB_{max} - a) / b	
	V	F	d	D_{av} / n		Number of passes				Tot.		
1	100	0.071	0.2	60/531	Np	2	2	2	2	8	a	18.728
					VB (mm)	80	160	200	264		b	9.242
					t (min)	6.63	13.27	19.9	26.54		TL	30.44
2	100	0.092	0.4	58/549	Np	2	2	2	2	8	a	39.333
					VB (mm)	85	150	175	222		b	9.226
					t (min)	4.95	9.9	14.85	19.8		TL	28.25
3	100	0.125	0.6	56/569	Np	2	2	2	2	8	a	59.302
					VB (mm)	92	160	170	190		b	9.289
					t (min)	3.52	7.03	10.55	14.07		TL	25.91
4	120	0.071	0.4	54/708	Np	2	2	2	2	8	a	61.602
					VB (mm)	110	171	184	255		b	9.718
					t (min)	4.98	9.95	14.93	19.9		TL	24.53
5	120	0.092	0.6	52/735	Np	2	2	2	2	8	a	87.303
					VB (mm)	121	180	194	222		b	9.107
					t (min)	3.7	7.39	11.09	14.79		TL	23.35
6	120	0.125	0.2	50/764	Np	2	2	2	2	8	a	91.63
					VB (mm)	120	130	190	205		b	10.828
					t (min)	2.62	6.54	7.85	10.47		TL	19.24
7	140	0.071	0.6	48/929	Np	2	3	2		7	a	120.816
					VB (mm)	152	188	204			b	8.228
					t (min)	3.79	9.48	13.27			TL	18.41
8	140	0.092	0.2	46/969	Np	2	3	2		7	a	126.238
					VB (mm)	153	182	215			b	9.558
					t (min)	2.8	7.01	9.81			TL	18.18
9	140	0.125	0.4	44/1013	Np	2	3	2		7	a	150.034
					VB (mm)	170	225	230			b	10.135
					t (min)	1.97	4.93	6.91			TL	14.80

4.3 Conclusions

This chapter provides a detailed explanation of the experimental testing methodology in relation to the measurement techniques and limiting criteria that were used to meet the objectives of the study.

- The protocol for measuring the surface roughness parameter (Ra),
- Tool wear measurement (VB) protocol with a critical maximum limiting value of 300 µm
- Determination of tool life (TL) time based on the critical value of tool wear by extrapolation of time wear curves for nine experimental tests.

5.MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF MACHINABILITY RESPONSES

5.1 Chapter Overview

This chapter presents the processing and analysis of experimental data, as well as an attempt to develop suitable mathematical models with first-order multiple regression, which will determine the degree of influence of processing parameters on the performance of measurements obtained from the experiment developed in the previous chapter. Taguchi's L9 orthogonal array was utilized to find the optimal experimental factors level for minimizing tool wear, maximizing

tool life, and minimizing surface roughness. The experimental results of surface roughness (Ra), tool wear (VB) and tool life (TL) were analyzed by the Analysis of Variance (ANOVA), Normally test, first-order linear regression, response optimizer analysis and Taguchi approach technique using Minitab 18 software.

5.2 Mathematical modeling of surface roughness, tool wear and tool life

The experimental results obtained in the previous chapter are used to derive the mathematical models of machinability response as surface roughness, flank wear and tool life using regression analysis. These models provide the possibility of ranking the optimal machining parameters from the optimal feasible solutions.

5.2.1 Regression analysis

For the purpose of this study, the Taguchi technique served both as the methodology for the experimental design and the method of analysis. Through a statistical method of performance measurement known as the S/N ratio, the experimental results are analyzed. The evaluation of the obtained experimental results is done by converting them to the signal-noise ratio (S/N). Calculating S/N ratios requires using one of three methods, depending on the sort of characteristic being measured: the nominal method, the smaller is better method, or the larger is better method. Since the surface roughness values are desired to be the smallest in order to determine the S/N values in this research, the formula corresponds to the principle 'smaller is better' given in Eq. (3.4). Regression analysis presents a relationship between variables according to a mathematical model that fits a set of sample data [5.1]. In this case, the regression model is as follows: In this case, the regression model without factor interaction is as follows:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 \quad (5.1)$$

where: y is the estimation of machinability response by regression model, x_1, x_2, $x_{3,....}$ represent to machining factors respectively. The regression coefficients b_1, b_2,... b_3, are respective estimated effects, and b_0 is equal to the total mean of machinability response.

5.2.1.1 Analysis of variance (ANOVA)

It was mentioned earlier that the test for the significance of the regression model, the test of significance on the individual coefficients of the model and the test for lack-of-fit should be performed. Analysis of variance tables are commonly used to summarize test experiments performed. Table 5.1 to 5.3 shows the ANOVA tables for the linear response surface models Eq. 5.2 to 5.4 for surface roughness, tool wear and tool life. The experimental design and statistical analysis was carried out according to the Taguchi method using Minitab 18 software. The experimental results of surface roughness (Ra), tool wear (VB), and tool life (TL) values were analyzed with Analysis of variance (ANOVA), used to identify the factors significance on the machinability responses. The results of ANOVA of surface roughness, tool wear, and tool life was given in the Tables 5.1, 5.2, and 5.3. This statistical analysis was performed for a significance level of $\alpha = 0.05$, i.e. for a confidence level of 95%. Sources with P-values ($P<0.05$) are considered to have a statistically significant contribution to the performance measures, reported by Rao and Kambagowni [113] (2016).

Table 5.1 shows the results of ANOVA for surface roughness. It is evident from the results that feed rate (f) is the most significant parameter with its contribution of 65.70%, then cutting speed (v) as a secondary factor with 23.30% and depth of cut (d) as the third influencing factor with of 1.07% contribution. Since it can be seen from the analysis of table 5.1 that the P-values of the cutting speed (0.019) and the feed rate (0.02) are less than the significance level $\alpha = 0.05$, then it can be concluded that the first two factors affecting the surface roughness have the greatest significance, while the depth of cut with its P-value (0.496) greater than (0.05) is insignificant. Table 5.2 and 5.3 shows the ANOVA results for tool wear and tool life. The analysis of Tabs 5.5 and 5.6 found that the first factor affecting the tool wear (VB) and tool life (TL) is the cutting speed with its contribution of 95,18%, respectively 89,00%, then the feed rate with 3,22%, respectively 5,94% and the depth of cut with 0,29%, respectively 2,07% as secondary factors, has less importance in controlling the value tool wear (VB) and tool life (TL).From the analysis of Table 5.2, it is evident that the P - values of the regression model (0.0001), cutting speed (0.0001) and feed rate (0.017) are less than (0.05), which means that they significantly affect

tool wear, while depth of cut with its P-value (0.342) is less significant.
Table 5.3 shows the ANOVA results for tool life. From the results, it can be seen that the cutting speed (v) is the most significant parameter with its contribution of 89 %, followed by the feed (f) with 5.94 % and the cutting depth (d) with 2.07 % has less importance in controlling the value tool life. From the analysis of Table 5.3, it is evident that the P - values of the regression model (0.0001), cutting speed (0.0001) and feed rate (0.025) are less than (0.05), which means that they significantly affect tool life, while cutting depth with its P-value (0.1211) less significant.

Table 5.1 Analysis of Variance for surface roughness

Regression Analysis: Ra versus v; f; d
Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	0,012629	90,07%	0,012629	0,004210	15,11	0,006
v	1	0,003267	23,30%	0,003267	0,003267	11,73	0,019
f	1	0,009213	65,70%	0,009213	0,009213	33,07	0,002
d	1	0,000150	1,07%	0,000150	0,000150	0,54	0,496
Error	5	0,001393	9,93%	0,001393	0,000279		
Total	8	0,014022	100,00%				

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0,0166900	90,07%	84,11%	0,0058786	58,08%

Regression Equation

Ra = 0,2574 - 0,001167 v + 1,439 f + 0,0250 d

Table 5.2 Analysis of Variance for tool wear (VB)

Regression Analysis: VB versus v; f; d
Analysis of Variance

Source	F	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	8212,88	98,69%	8212,88	2737,63	125,44	0,00004
v	1	7920,67	95,18%	7920,67	7920,67	362,92	0,00001
f	1	268,21	3,22%	268,21	268,21	12,29	0,017
d	1	24,00	0,29%	24,00	24,00	1,10	0,342
Error	5	109,12	1,31%	109,12	21,82		
Total	8	8322,00	100,00%				

Model Summary

S	-sq	q(adj)	ESS	q(pred)
67168	69%	,90%	1,828	5,29%

Regression Equation

VB = -125,2 + 1,8167 v + 245,6 f + 10,00 d

Table 5.3 Analysis of Variance for tool life

Regression Analysis: TL versus v; f; d
Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	200,370	97,02%	200,370	66,790	54,18	0,00031
v	1	183,817	89,00%	183,817	183,817	149,11	0,00007
f	1	12,268	5,94%	12,268	12,268	9,95	0,02524
d	1	4,284	2,07%	4,284	4,284	3,48	0,12111
Error	5	6,164	2,98%	6,164	1,233		
Total	8	206,534	100,00%				

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
1,11028	97,02%	95,23%	20,9700	89,85%

Regression Equation

TL = 63,05 – 0,2768 v – 52,5 f – 4,23 d

5.2.1.2 Predictive mathematical models of surface roughness, tool wear and tool life

The relationship between machining parameters (cutting speed, feed rate, and depth of cut) and machining responses such as surface roughness (Ra), tool wear (VB), and tool life (TL) were modeled by linear regression based on Eq. 5.1. Linear regression coefficients b_1, b_2, b_3 and b_0, have been determined using Minitab-18 software, as shown in Tables 5.1, 5.2 and 5.3. The obtained predictive models are presented in the following equations:

$$Ra = 0.2574 - 0.001167\, v + 1.439\, f + 0.0250\, d \quad (\mu m) \qquad (5.2)$$

$$VB = -125.2 + 1.8167\, v + 245.6\, f + 10\, d \quad (\mu m) \qquad (5.3)$$

$$TL = 63.05 - 0.2768\, v - 52.5\, f - 4.23\, d \quad (min) \qquad (5.4)$$

5.2.1.2.1 Validation of predictive models

In order to test the statistical validity of the predictive models, some analyses and diagnostic plots should be evaluated, such as Normal Probability Plots of Eqs.5.2 to 5.4, shown in Figures 5.1 to 5.3, and F- statistic test from results of Analysis of Variance Tabs 5.1 to 5.3.

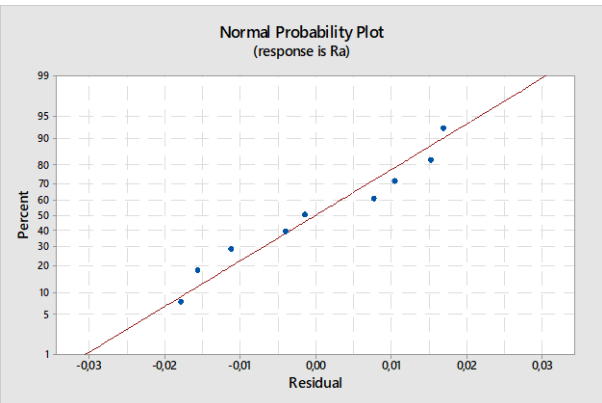


Figure 5.1 Normal probability charts for Ra

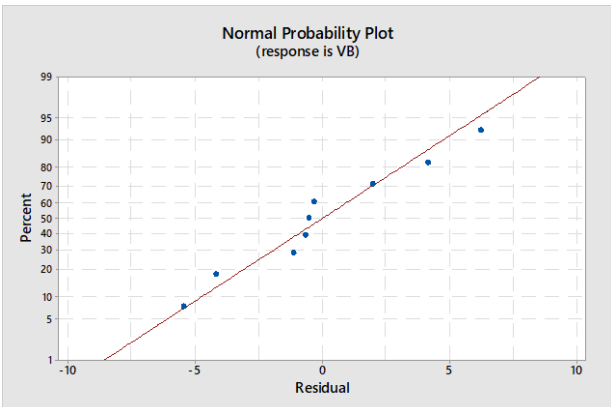


Figure 5.2 Normal probability charts for VB

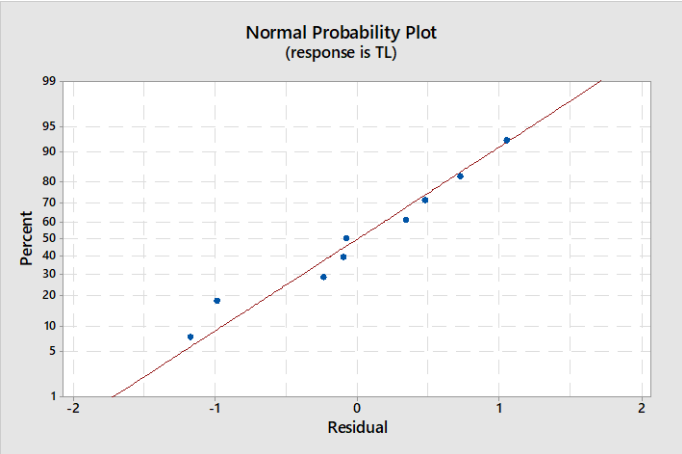


Figure 5.2 Normal probability charts for TL

As seen in Figs 5.1 to 5.3, the residuals approximately follow a straight line in normal residual plots, implying that the errors are normally distributed. This distribution shown in the figures above shows that the assumption of normality of the error is valid.

This provides support for the developed predictive linear regression models of surface roughness, tool wear and tool life Eq. 5.2 to 5.4 that they are statistically significant, adequate and accurate, which is consistent with the respective F-statistic values (15.11; 125.44 and 54.18) and P -values (0.006; 0.00004 and 0.00031) and is less than 0.6; 0.004 and 0.031 percent chance that a critical

F - value could occur due to noise.

From the analysis of Tabs 5.1 to 5.3, it is apparent that, the calculated respective F-values (66.15; 125.44 and 54,18) of Ra, VB and TL are higher than the table critical F-value $F_{(DF1/DF2)}=F_{(3/5)}=5.4095$), as seen from handbook tables of Beyer W. [114] (2017). In the F - table of critical values columns specify the numerator degrees of freedom (DF1), while rows set the denominator's (DF2).

The F- test appears to be a statistical test that is most often used when comparing statistical models that have been fitted to a set of data, in order to identify the model that best fits the population from which the data were drawn.

If the value of the F-statistic test is higher than the statistic calculated from the null hypothesis, then a statistically significant relationship between the predictor and the outcome variable can be concluded.

5.2.1.3 Taguchi analysis: Signal - to - noise (STN) ratio

In Taguchi method, the term S - stands for signal and represents the desirable value, and N - noise represents the undesirable value. The process parameters (factors) with the highest S/N (STN) ratio always give the best quality with minimum variance, as reported in his book by Phadke M. [104] (1989).

Tables 5.4 to 5.6 shows the response table for STN ratio of surface roughness, tool wear and tool life.

Table 5.4 Experiment results and STN ratio for surface roughness

Exp. No.	Cutting speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	Ra (µm)	S/N Ratio
1	100	0.071	0.2	0.23	12.8033
2	100	0.092	0.4	0.30	10.3980
3	100	0.125	0.6	0.32	9.8429
4	120	0.071	0.4	0.24	12.3958
5	120	0.092	0.6	0.28	11.1641
6	120	0.125	0.2	0.31	10.1915
7	140	0.071	0.6	0.20	14.1328
8	140	0.092	0.2	0.23	12.7278
9	140	0.125	0.4	0.28	10.9387

Table 5.5 Experiment results and STN ratio for tool wear

No.	Cutting speed(m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	VB (µm)	S/N
1	100	0.071	0.2	80	-38.0618
2	100	0.092	0.4	85	-38.5884
3	100	0.125	0.6	92	-39.2758
4	120	0.071	0.4	110	-40.8279
5	120	0.092	0.6	121	-41.6557
6	120	0.125	0.2	120	-41.5836
7	140	0.071	0.6	152	-43.6369
8	140	0.092	0.2	153	-43.6938
9	140	0.125	0.4	170	-44.609

Table 5.6 Experiment results and STN ratio for tool life

No.	Cutting speed(m/min)	Feed (mm/rev)	Depth of cut (mm)	TL (min)	S/N
1	100	0.071	0.2	30.44	29.66889
2	100	0.092	0.4	28.25	29.02037
3	100	0.125	0.6	25.91	28.26935
4	120	0.071	0.4	24.53	27.79395
5	120	0.092	0.6	23.35	27.36574
6	120	0.125	0.2	24.12	27.64755
7	140	0.071	0.6	18.41	25.30108
8	140	0.092	0.2	18.18	25.19188
9	140	0.125	0.4	14.8	23.40523

Table 5.7 Response for STN Ratios and Means for Ra, VB and TL

Taguchi Analysis: Ra versus v; f; d
Response Table for Signal to Noise Ratios
Smaller is better

Level	v	f	d
1	11,04	13,05	11,90
2	11,21	11,43	11,30
3	12,60	10,38	11,64
Delta	1,56	2,67	0,60
Rank	2	1	3

Response Table for Means

Level	v	f	d
1	0,2833	0,2233	0,2567
2	0,2767	0,2700	0,2733
3	0,2367	0,3033	0,2667
Delta	0,0467	0,0800	0,0167
Rank	2	1	3

a)

Taguchi Analysis: VB versus v; f; d
Response Table for Signal to Noise Ratios
Smaller is better

Level	v	f	d
1	-38,64	-40,84	-41,11
2	-41,36	-41,31	-41,34
3	-43,98	-41,82	-41,52
Delta	5,34	0,98	0,41
Rank	1	2	3

Response Table for Means

Level	v	f	d
1	85,67	114,00	117,67
2	117,00	119,67	121,67
3	158,33	127,33	121,67
Delta	72,67	13,33	4,00
Rank	1	2	3

b)

Taguchi Analysis: TL versus v; f; d
Response Table for Signal to Noise Ratios
Larger is better

Level	v	f	d
1	28,99	27,59	27,50
2	27,60	27,19	26,74
3	24,63	26,44	26,98
Delta	4,35	1,15	0,76
Rank	1	2	3

Response Table for Means

Level	v	f	d
1	28,20	24,46	24,25
2	24,00	23,26	22,53
3	17,13	21,61	22,56
Delta	11,07	2,85	1,72
Rank	1	2	3

c)

Tables 5.4 to 5.6 shows the response table for STN ratio of surface roughness, tool wear and tool life. In the following, the experimental data were analyzed using the Taguchi method through which S/N ratios and level values were calculated using the STN equation "the smaller is better" for surface roughness and tool wear as well as "the larger is better" for tool life, in optimum cutting conditions
according to Tabs 5.4 to and 6.6, and the obtained results are presented in Tables 5.7.

5.3 Optimization of machinability responses

To realize the optimization of predictive mathematical models Eq.5.2 to 5.4, searches a combination of factor levels is required that simultaneously fulfill the requirements set for each of the machinability responses and factors. In this work, the optimization is performed numerically

and graphically based on the Main Effects Plots for means values of the STN ratio in Figures 5.4 to 5.6, Response Optimizer Function Fig. 5.7 to 5.9 and Contour Plots Figs. 5.10 to 5.12 in order to determine the optimal design conditions for obtaining low values of surface roughness (Ra) and tool wear (VB), as and high values of tool life (TL).

5.3.1 Main Effects Plots for Means and Signal-to-Noise Ratio Analysis

From the STN ratios given in the Table 5.7 a, b and c main effect plots were drawn using Minitab-18 software and shown in the Fig 5.4 to 5.6 respectively.

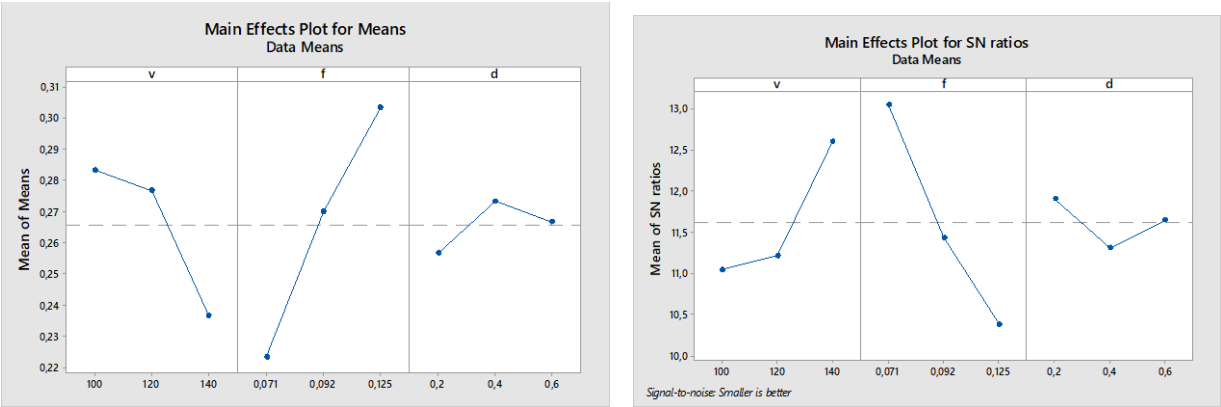


Figure 5.4 Main Effects Plot for Means and STN ratio for Ra

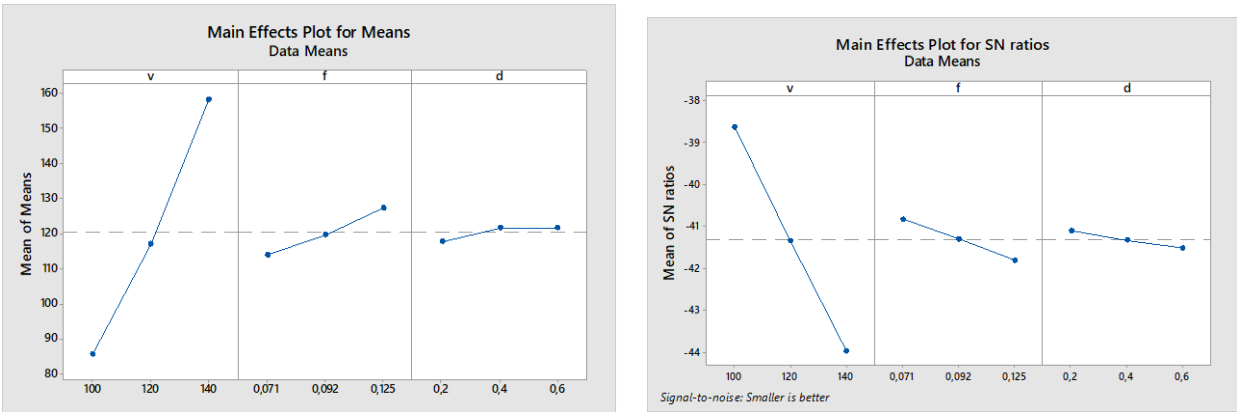


Figure 5.5 Main Effects Plot for Means and STN ratio for VB

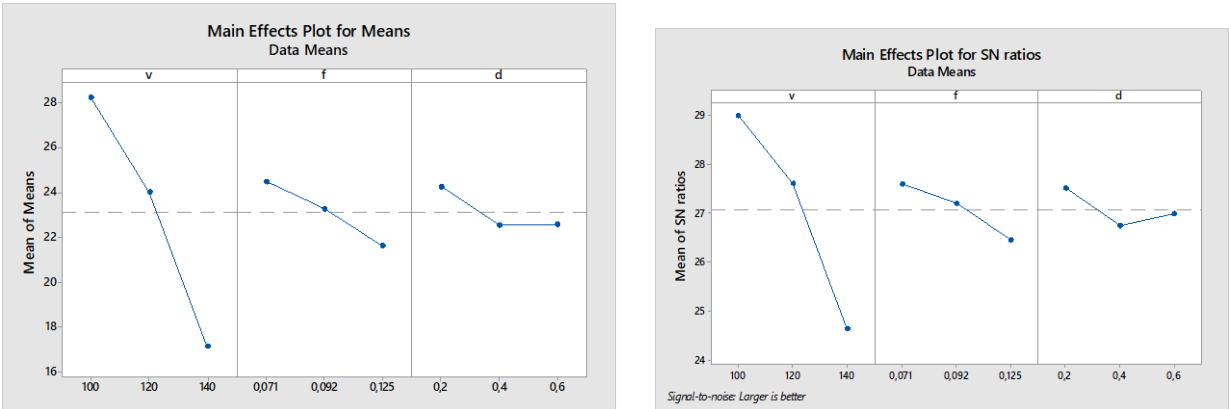


Figure 5.6 Main Effects Plot for Means and STN ratio of TL

The graphs above show the variation of the machinability responses with the change in the cutting parameters. In the plots Figs 5.4 to 5.6, the X-axis indicates the value of each process parameter at three levels and the Y-axis the corresponding response value.

Analysis is then performed to determine the adjustment factor of each main factor from the response main effects plot for the mean and STN ratio.

In figure 5.4 a) and b) it can be seen that with the increase in the cutting speed levels (v) there is a significant change in the decrease of the surface roughness of parameter (Ra), while with

increasing of feed rate (f) also there is a significant change but in increasing of surface roughness. On the other hand, with an increase in the depth of cut up to the middle level, a small change in the increase of the surface roughness is observed, and then up to the high level, a small change in the reduction of the surface roughness is observed.
When Fig. 5.4.a) and b) were examined, it was seen that level (3) of the cutting speed (v), and level (1) of the feed rate (f) and depth of cut (d) were the effective parameters for lowest value of surface roughness in the experimental study. The optimal cutting parameters for parameter of Ra surface roughness were $v_3f_1d_1$ (v_3=140 m/min, f_1= 0.0.071 mm/rev and d_1=0.2 mm).
Since the optimal combination v_3, f_1, d_1 does not exist in the conducted experimental matrix, then the value of the surface roughness parameter (Ra) for the optimal conditions was calculated based on the predictive equation Eq. 5.2, and its value is Ra=0.246 µm, as seen in Table 5.8.

Table 5.8 Optimum Conditions for Surface Roughness

Parameter	Best level	Value	Predictive-Ra, µm
Cutting speed, m/min	3	140	0.246
Feed rate, mm/rev	1	0.071	
Depth of cut, mm	1	0.2	

Figure 5.5 shows the response table for STN ratio of flank wear (VB) for “smaller is better” obtained for different parameter levels.
Figure 5.6 shows the response main effects plot for means and STN ratio table of tool life (TL) for “larger is better” obtained for different parameter levels.
In the STN ratio impact analysis, the factor level will be chosen to give the maximum STN ratio as the most appropriate factor level. After examining figures 5.5 and 5.6, it was seen that level 1 cutting speed (v), level 1 feed rate (f) and level 1 depth of cut (d) are effective parameters for the lowest value of tool wear (VB) and the highest value of tool life (TL) in an experimental study. Therefore, the optimal cutting parameters for tool wear and tool life were $v_1f_1d_1$ (v_1=100m/min, f_1= 0.071, mm/rev, d_1=0.2 mm), as seen in Tables 5.9 and 5.10.

Table 5.9 Optimum Conditions for VB

Parameter	Best level	Value	Predictive-VB, µm
Cutting speed, m/min	1	100	75.91
Feed rate, mm/rev	1	0.071	
Depth of cut, mm	1	0.2	

Table 5.10 Optimum Conditions for TL

Parameter	Best level	Value	Predictive-TL, µm
Cutting speed, m/min	1	100	34.504
Feed rate, mm/rev	1	0.071	
Depth of cut, mm	1	0.2	

5.3.2 Response Optimizer Analysis

The response optimizer is used to identify the combination of settings of input variables that optimize a single response or set of responses. Minitab software version 18 performs a calculation to determine the best option and creates an optimization graph. Modifying the parameters of the input variables in this interactive scheme enables the performance of sensitivity analysis, which can lead to an improvement in the initial answer.
In order to find the most appropriate values (levels) of the cutting parameters that best affect surface roughness (Ra), tool wear (VB), and tool life (TL), the researcher using Minitab Release 18, Response Optimizer and selecting the desirability function R_{amin}, VB_{min} and TL_{max} found the appropriate values of the cutting factors, and the obtained values shown in Figs 5.7 to 5.9.
After evaluation, the values obtained for minimum surface roughness (Ra) and tool wear (VB), as well as for maximum tool life (TL) are as follows:

- Surface roughness: cutting speed (level 3), feed rate (level 1) and depth of cut (level 1). The

minimum value is predicted at 0.2012 (µm), expected to be reached with cutting speed v=140 m/min, feed rate f=0.071 mm/rev and depth of cut d=0.2 mm, and optimal of d=0.9897 mm, as seen in Figure 5.7.

- Tool wear: cutting speed, feed rate and depth of cut that all three correspond to (level 1), i.e cutting speed v_1=100 m/min, feed rate f_1=0.071 mm/rev and depth of cut d_1=0.2 mm. The predicted minimum value is VB=75.8596 (µm), and optimal d=0.9765 mm, as seen in Figure 5.8.
- Tool life: The appropriate tool life value is the highest and longest value at 30.8033 min. Determining the cutting speed as 100 m/min, the feed rate as 0.071 mm/rev, and the cutting depth as 0.2 mm, i.e. the optimal value according to Figure 5.9 is d=1 mm.

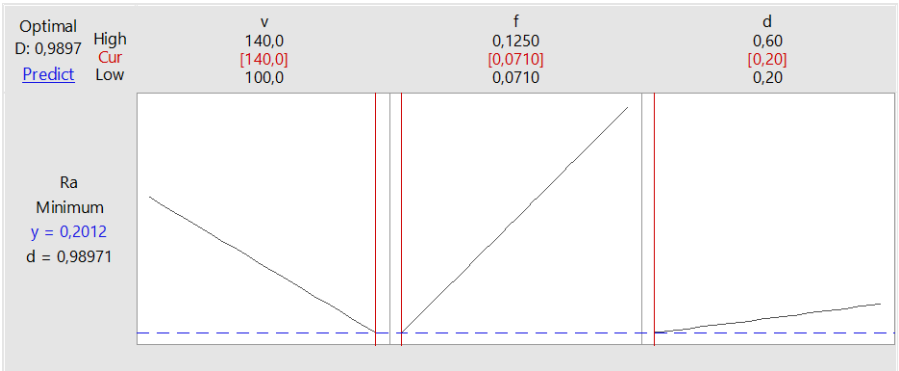


Figure 5.7 The appropriate value of each factor which effect to surface roughness

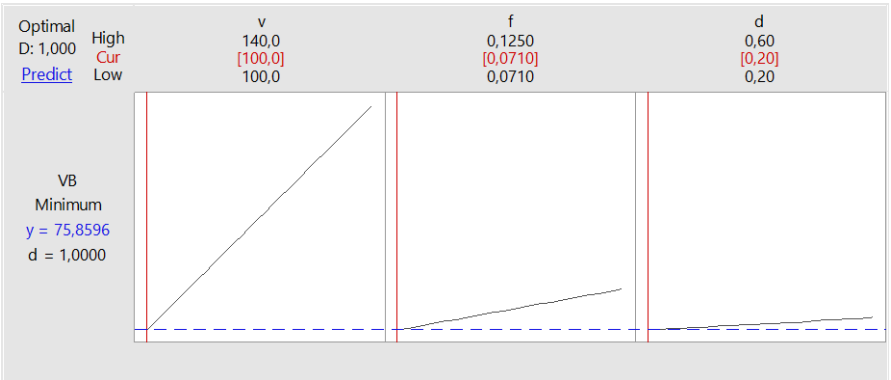


Figure 5.8 The appropriate value of each factor which effect to tool wear

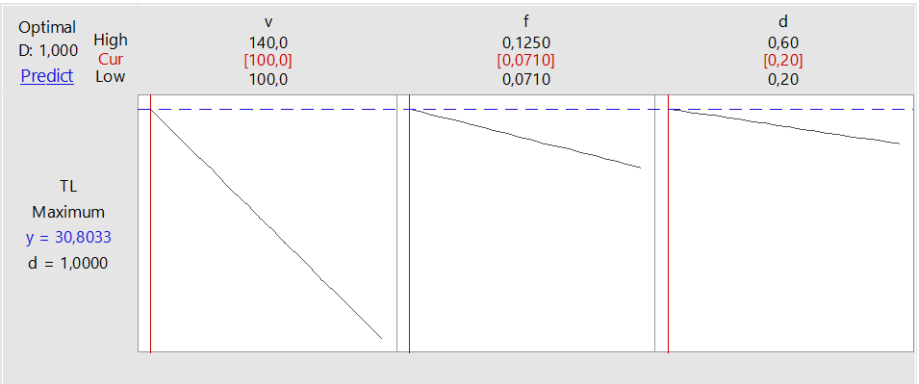


Figure 5.9 The appropriate value of each factor which effect to tool life

5.4 Confirmation test

After determining the optimal level of process parameters, the following stage was to predict and validate the improvement of performance characteristics using the combination of parameters. Taguchi technique and regression equations were subjected to confirmatory testing of process parameters at optimal and random levels. The comparison of the test results with the expected values derived from the Taguchi method and the regression equations (Eq. 5.2 to 5.4) is presented in Table 5.11. The results of the confirmation test show that the measured values fell within the 95% confidence interval, so the calculation of the error percentages of the response

characteristics are within acceptable limits, except for the random level $v_2f_2d_2$ of the surface roughness parameter for the predicted linear regression. The findings show that the Taguchi method is a reliable approach for minimizing surface roughness, tool wear, as well as maximizing tool life, which affect the reduction of machining time and production costs as in the CNC alloy turning process. Inconel 718.Therefore, this optimization can be considered successful, as evidenced by the results of the confirmation tests.

Table 5.11. Confirmation results for Taguchi method and linear regression

Level	Taguchi method			Linear regression		
	Exp	Predict	Error (%)	Exp	Predict	Error (%)
Ra (µm)						
$v_3f_1d_1$(Optimum)	0.195	0.186	4.61	0.19	0.201	3.1
$v_2f_2d_2$ (Random)	0.276	0.289	4.71	0.27	0.259	6.16
$v_1f_3d_1$ (random)	0.322	0.329	2.13	0.322	0.326	1.23
VB (mµ)						
$v_1f_1d_1$(Optimum)	75	76.67	2.22	75	75.91	1.21
$v_2f_2d_2$ (Random)	118	116.67	1.13	118	119.4	1.18
$v_1f_2d_3$ (Random)	86	86.33	0.38	86	85.07	1.1
TL (min)						
$v_1f_1d_1$(Optimum)	30	29	3.33	30	30.8	2.67
$v_2f_2d_2$ (Random)	23	23.57	2.48	23	23.31	1.35
$v_3v_2d_1$(Random)	19	18.42	3.1		18.62	2

5.5 Conclusion

- The experimental data from turning Inconel 718 using coated carbide cutting tool inserts are analyzed by means of the statistical simulation software for predicting the effect of various input machining parameters such as cutting speed, feed and depth of cut on the surface roughness, tool flank wear and tool life.
- Suggested first-order linear regression models that best fit the established criteria are discussed above. The responses could be predicted at any mid-points using the adequate models.
- ANOVA of predictive regression models identified the most contributing factor to surface roughness is feed rate 65.70%, until for tool wear and tool life is cutting speed with 95.18% respectively 89%.
- The findings show that the Taguchi method is a reliable approach for minimizing surface roughness, tool wear, as well as maximizing tool life, which affect the reduction of machining time and production costs in the CNC turning process of Inconel 718 alloy.
- This chapter presented the Taguchi method as a reliable method for determining optimal machining parameters for improving response characteristics for minimum surface roughness, tool wear, as well as maximum tool life. Also, Taguchi experimental design improves quality, reduces cost, and provides robust design solutions.
- The results of the confirmation tests indicate that this optimization was successful.

6 GRAPHICAL OPTIMIZATION OF REGRESSION MODELS

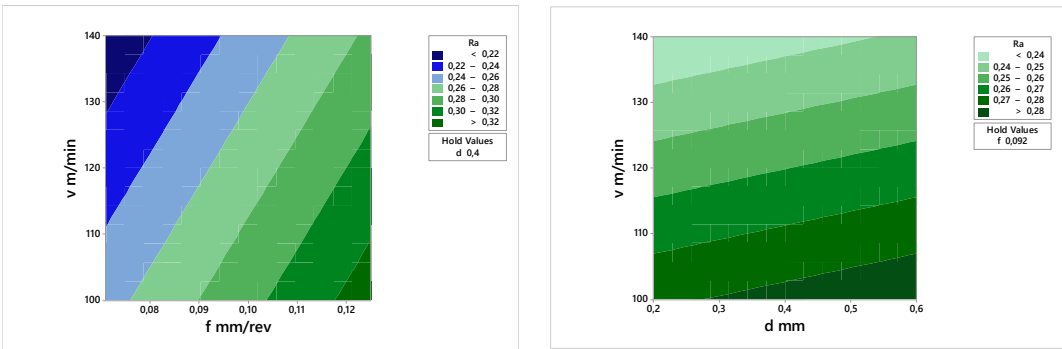
6.1 Chapter overview

This chapter presents the graphical optimization and evaluation of the first-order linear regression models obtained from experimental results in previous chapter Eqs. 5.2 to 5.4. Using Minitab -18 software were generated Contour plots and Surface plots that can graphically explain the result without going into too much detail in the technical aspect of the subject. The 2D contour plots was used to show graphically optimization of possible values of response characteristics. In addition, the 3D surface plots are utilized to investigate the possible link that exists between three variables i.e. response characteristic variable and two independent

variables.

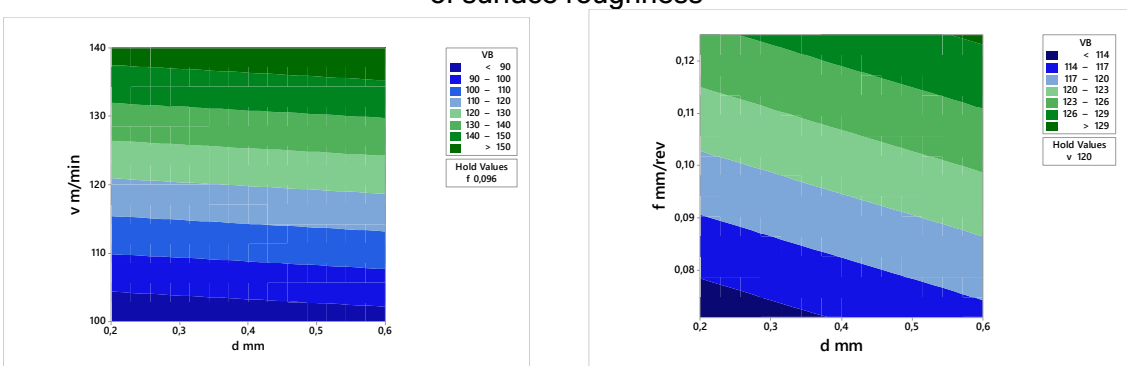
6.2 Contour Plots Analysis

Contour plots make it possible to represent three-dimensional graphs on a two-dimensional surface with the help of provided input variables, i.e. with the x- and y- factors plotted on the x- and y-scales and the response values represented by contours. Figures 6.1 to 6.3 show the contour plots obtained for surface roughness (Ra), flank wear (VB) and tool life (TL) for the middle level of the cutting factors. The contour plots shown in Figs 6.1 a, b and c to 6.3 a, b and c shows the correlation between the cutting speed and feed rate (v-f), the cutting speed and depth of cut (v-d) and the feed rate and depth of cut (d-f).



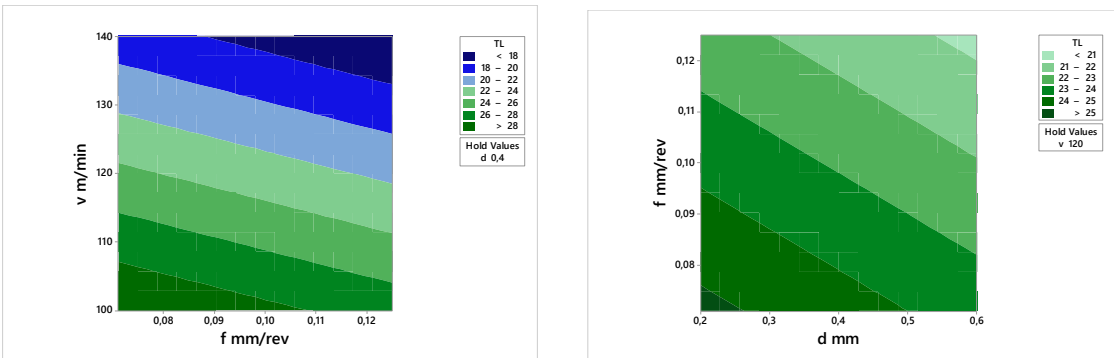
a) b)

Figure 6.1 Effects of the experimental parameters and 2D contour plots; a= f-v, b=d-v; of surface roughness



a) b)

Figure 6.2 Effects of the experimental parameters and 2D contour plots; a= v-d, b=f-d; of tool wear (VB)



a) b)

Figure 6.3 Effects of the experimental parameters and 2D contour plots; a= v-f, b=f-d; of tool life (TL)

From analysis of the contour plots shown in Figs 6.1 a, b, and c to 6.3 a, c and d revealed that the contour plots are the straight line. Therefore, the appropriate mathematical model for predicting the optimal value is the linear regression model Eq. 5.2. Analyzing Figs 6.1 a, b and c, it was observed that the lowest value of surface roughness (Ra) found in Fig. 510 a, was in

the dark blue area of the Ra plot below <0.22 µm with approximate cutting conditions (f ≈ 0.082 mm/rev, v ≈ 128 m /min and d ≈ 0.4 mm). Dark blue areas in the plot Figure 6.2 a, b and c, represent areas of optimal cutting conditions of tool wear, while dark green regions indicate that VB is deteriorating due to cutting conditions. It was observed that the best VB value was below <80 µm near cutting conditions (v ≈ 100-103 m/min, f ≈ 0.071- 0.08 mm/rev, and d ≈ 0.2-0.4 mm), as seen in Figure 6.2 c. From the contour plot shown in Figure 6.3 a, b and c, it was observed that the best value of tool life (TL) was > 28 min in green dark area. Figure 6.3 c, for cutting conditions (v ≈ 100-106 m/min, f ≈ 0.071-0.10 mm and d ≈ 0.2-0.5 mm).

6.3 Surface Plots Analysis

3D contour plots are, also known as 3D surface plots used to represent three-dimensional data. 3D surface plots are a type of graph that can be utilized in order to investigate the possible link that exists between three variables. The prediction variables are plotted on the x- and y-axes, while the response variable (z) is depicted as a continuous surface (3D surface plot).

In this study, 3D surface plots were drawn using Minitab-18 software to find the relationship between response variables such as surface roughness (Ra), tool wear (VB) and tool life TL) with cutting parameters (v, f and d) which are shown in Appendix E, Figs E-1 to E-27. Surface plots show how one response variable relates to two factors with a third on hold based on the model in Eq. 5.2 through 5.4. They have a planar shape in accordance with the established model i.e. first-order linear model. Figs E-2, E5 and E-8 show the effect of cutting speed (v), feed speed (f) and depth of cut (d) on the surface roughness, respectively the correlation between v-f, v-d and f-d on it, for the middle level of hold value.

It can be seen that as the cutting speed increases, the surface roughness decreases, while the feed rate and depth of the cut increases surface roughness increases. Figs E-11, E-14 and E-17 show the effect of cutting speed (v), feed rate (f) and depth of cut (d) on the tool wear (VB), respectively the correlation between v-f, v-d and f-d on it, for the middle level of hold value. It can be seen that as the cutting speed increases, the surface roughness decreases, while the feed rate and depth of the cut increases surface roughness increases. Figs E20, E-23 and E-26 show the effect of cutting speed (v), feed rate (f) and depth of cut (d) on the tool life (TL), respectively the correlation between v-f, v-d and f-d on it, for the middle level of hold value. Here it can be seen that with the increase in cutting speed, feed rate and depth of cut, the tool life decreases.

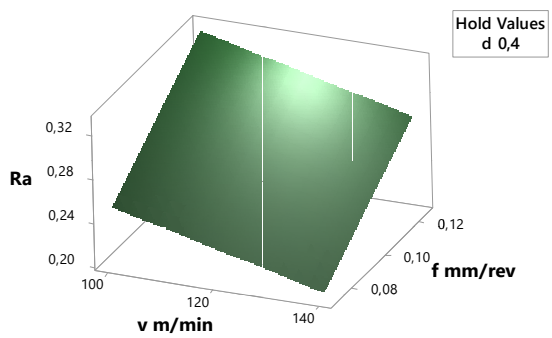


Figure E-2 Effect of v-f on 3D plot of Ra

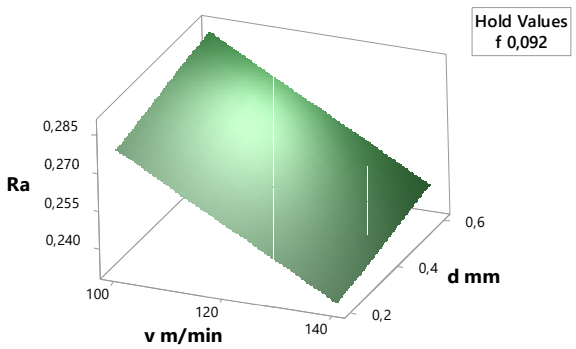


Figure E-5 Effect of v-d on 3D plot of Ra

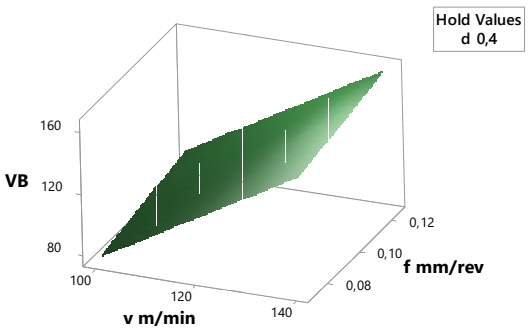


Figure E-11 Effect of v-f on 3D plot of VB

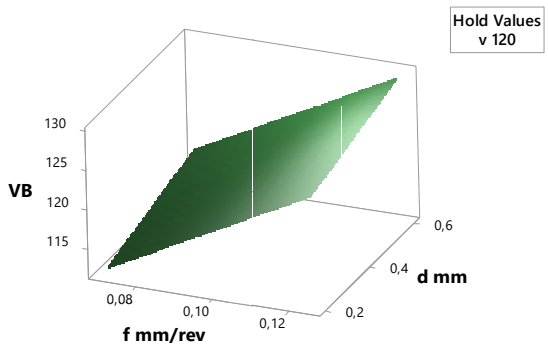


Figure E-17 Effect of f-d on 3D plot of VB

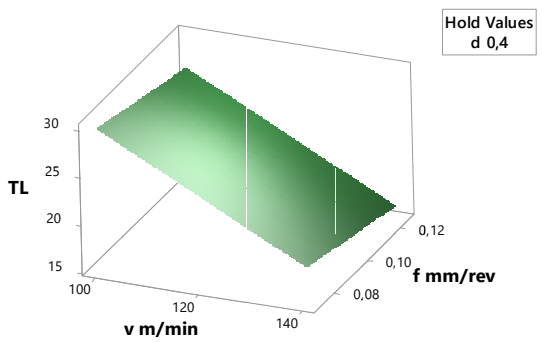


Figure E-20 Effect of v-f on 3D plot of TL

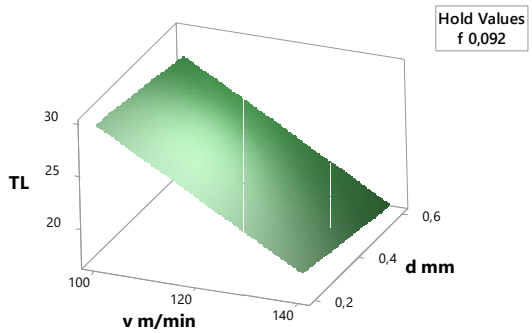


Figure E-23 Effect of v-d on 3D plot of TL

6.4 Conclusion

- In this chapter, first-order models were constructed along with contour plots to enable easier selection of the appropriate combination of cutting speed, feed rate and depth of cut to find the optimal area of surface roughness, tool wear and tool life.
- The results of the graphical optimization are very useful for choosing the values of the turning parameters in the workshop quickly in order to obtain a particular response characteristic.
- The 2D contour plot as graphical optimization technique allows visual selection of the optimum machining conditions according to certain criterion.
- Also, 2D contour plots and 3D surface plots of the desirability function at each optimum can be used to explore the function in the factor space.

7 CONTRIBUTIONS

7.2.1 Scientific contributions

- The obtained mathematical models that describe the correlation between the cutting parameters and the processing responses are achieved through theoretical and experimental research. These models enable the prediction of tool wear, tool life and surface roughness.
- Development of empirical mathematical models that integrate experimental, numerical and analytical knowledge in the field of production process planning and optimization in a systematic, scientific and reliable way.
- The accuracy and significance of first order predictive mathematical models of machinability responses are validated for oblique cutting conditions based on comparison of the experimental and analytical results data published in various scientific researches.

7.2.2 Scientific/Applied contributions

- The results of the research enable the formation of a knowledge base, which, together with the installation of appropriate sensors, is required to obtain an intelligent processing system.
- Predictive models of the machining process assist in the analysis of optimization problems in machining economics, in CNC adaptive control optimization (ACO) applications, and in the formulation of simulation models used in metal cutting databases.
- The analysis of the effect of each parameter on each machining response and the interactions between the parameters makes it clear that surface roughness, flank wear and tool life can be controlled at the design stage of the cutting process, which is the most effective and cheapest way.

7.2.3 Applied contributions

- The wear behavior analysis of cutting tools is conventionally reliant on extensive experimental tests that are both time-consuming and expensive. However, the utilization of the

extrapolation approach based on the wear-time curves in accordance with Equation 2.22 has been shown to significantly reduce these costs.

- The first-order linear mathematical models developed enable analysis of processing responses, including Ra, VB and TL. They allow modeling and optimization of each response separately or simultaneously, numerically or graphically, and are suitable for use in both serial and mass production cutting processes.
- The study reveals that as cutting parameters are increased, the process of tool flank wear (VB) would become worse.
- The study also shows that with the increase of any of the cutting parameters, the tool life decreases.

7.3 Recommendation for future research

However, there are some opportunities for improving the forecasting capability of the machinability responses models. Based on the results and the analysis of the experimental data, these recommendations for further work is being proposed in the following areas:

- In addition to the linear regression models of the first order, as another alternative for the prediction of machinability responses can be used the second order or higher models as well as exponential.
- The research can be extended by including more machinability responses (as well as cutting forces, temperature, machine power etc.) to give a complete picture of the processing of Inconel 718 alloy.
- The study can be extended by including more cutting parameters as well as tool nose radius, the tool cutting edge angle (κ_r), etc.
- Conduct study on different workpiece material and cutting tool combinations during wet and semi-dry machining.
- The geometry of the cutting inserts can be varied to study the effect of different types of inserts. For example, changing the rake angle (γ_n) and flank angle (α_n).
- Current trends in the industrial development of automated measuring technique to measure tool wear parameters (VB) in real time, manual and expensive tool wear measurements will be unnecessary, and after knowing the tool wear parameter in real time, the machine operator will be able to adjust the programmed cutting path to avoid distortion of processed dimensions due to tool wear, as state in study of Mikołajczyk et al. [110] (2018).
- In future studies, Taguchi as a single-optimization method combined with Gray Relation Analysis can solve the multi-variate response characteristics of the process which are generally known as multi-objective optimization, which have the possibility to optimize more dependent variables simultaneously.

III. Publications, Science Fields and Dissemination

A) SCOPUS

1. Fatlume Zhujani, Fitore Abdullahu, Mirlin Bruçi, and Nexhat Qehaja, (2023), Mathematical Modelling and Optimization of Surface Roughnes Based on Cutting Parameters in CNC Drilling Process Using ANOVA and Taguchi Method, Sustainable Regional Development in the Western Balkans, Academy of Science of Albania, March 31, 2023- Tirana, Albania. (accepted).

2. Fatlume Zhujani, Georgi Todorov and Konstantin Kamberov, (2023), Single Objective Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Turning of Inconel 718 Using Taguchi Approach, ICRETS 2023: International Conference on Research in Engineering, Technology and Science, The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM) ISSN: 2602-3199. (accepted).

3. Nexhat Qehaja, Fitore Abdullahu*, Fatlume Zhujani, (2018), Mathematical model determination for surface roughness during cnc end milling operation on 42CRMO4 hardened steel, International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 9(1), 624-632.

4. Nexhat Qehaja, Fitore Abdullahu and Fatlume Zhujani, (2018), Predictive mathematical modeling of tool life based on cutting parameters and workpiece material hardness using

regression analysis, International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 8(8), 1229-1237.

5. Nexhat Qehaja, Azem Kyçyku and Fatlume Zhujani, (2017), Tool wear modeling of hardened 42CrMo4 steel depending on cutting parameters and workpiece material hardness during turning process, Journal ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, 15 (4), 117-122.

6. Fatlume Zhujani**,** Nexhat Qehaja, Fitore Abdullahu* and Mirlind Bruçi, (2016), Mathematical modelling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters in drilling process, 27th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation DAAAM.

7. Qehaja Nexhat., Abdullahu Fitore, and Zhujani Fatlume, (2017), Predictive mathematical modeling of tool life based on cutting parameters and workpiece material hardness using regression, International Journal of Mechanical Engineering and Technology.

8. Nexhat Qehaja, Ilir Doçi*, Mirlind Bruçi, Fitore Abdullahu, Kaltrinë Jakupi and Fatlume Zhujani, (2016), 27th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation DAAAM.

9. Nexhat Qehaja, Ilir Doçi*, Mirlind Bruçi, Fitore Abdullahu, Kaltrinë Jakupi and Fatlume Zhujani, (2016), 27th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation DAAAM.

B) Web of Science

1. Fatlume Zhujani, Georgi Todorov and Konstantin Kamberov and Fitore Abdullahu, (2023), Mathematical Modelling and Optimization of Machining Parameters in CNC Turning Process of Inconel 718 Using Taguchi Method, --Manuscript Draft-- Journal of Engineering Research. (accepted).

ANOTATION

This PhD research focuses on the machinability of Inconel 718 super alloy, the most common nickel-based super alloy that is widely employed in the aerospace, automotive, and energy industries due to its exceptional thermomechanical properties. It is also a notoriously difficult-to-cut material due to its short tool life and low machining productivity. Despite substantial advancements in cutting tool technology, machining Inconel 718 remains a major difficulty.

As a result, extensive research was carried out, which included kinematics and factors influencing the turning process, theoretical models of surface roughness, tool wear, and tool life, as well as modelling and optimization strategies in turning processes.

The primary purpose of machining techniques is to produce high-quality, low-cost goods. As a result, machining economics is an important aspect in reaching such a goal.

To manufacture the best items possible, it is critical to select the appropriate machining conditions, such as cutting speed, feed rate, and depth of cut.

The machining economics problem entails choosing the best cutting parameters in order to maximize or minimize an objective function. Maximize profit rate, minimize unit production cost, maximize production rate, etc. are examples of common objective functions to optimize cutting parameters.

The problem of machining economics comprises selecting the appropriate cutting parameters to maximize or minimize an objective function. Examples of frequent objective functions for optimizing cutting parameters include maximize profit rate, minimize unit production cost, maximize production rate, and so on.

In order to achieve these economic objectives, the problem is addressed by designing and conducting an experimental research as well as the selection of mathematical modeling and process optimization methods that lead to the optimal combination of process parameters as well as their correlation with output responses characteristics.

In addition to the experimental work, the Taguchi technique, response surface methodology (RSM), and Analysis of Variance were used to optimize and mathematically modeling the machinability responses. Multiple first-order linear models were built to correlate the responses (surface roughness, flank wear, and tool life) and machining parameters.

Analysis of variance was used to examine the effect of cutting parameters on processing responses. Minitab-18's answer optimizer optimizes numerous responses using the Ramin, VBmin, and TLmax desirability functions. Minitab-18's answer optimizer optimizes numerous responses using the Ramin, VBmin, and TLmax desirability functions.

As result, the developed first-order linear mathematical models enable analysis of processing responses, including surface roughness parameter (Ra), tool flank wear parameter (VB) and tool life (TL). They allow modeling and optimization of each response characteristic separately or simultaneously, numerically or graphically, and are suitable for use in both serial and mass production cutting processes.