

Univerza v Ljubljani
Zdravstvena fakulteta



Tehnologije CAD/CAM

PETER BOHINC

LJUBLJANA, 2023

Tehnologije CAD/CAM

Avtor: pred. Peter Bohinc

Recenzenta: izr. prof. dr. Igor Kopač

izr. prof. dr. Jasmina Primožič

Lektoriranje: Nataša Petek Hvala

Založila: Založba Univerze v Ljubljani

Za založnika: prof. dr. Gregor Majdič, rektor

Izdala: Univerza v Ljubljani, Zdravstvena fakulteta

Za izdajatelja: izr. prof. dr. Andrej Starc, dekan

Ilustracije in prelom: pred. Peter Bohinc

Fotografije: pred. Peter Bohinc

Prva e-izdaja

Publikacija je brezplačna.

Ljubljana, 2023

Publikacija je dostopna v formatu PDF na:

<https://www.zf.uni-lj.si/si/predstavitev/zalozba/Tehnologije.pdf>

<https://ebooks.uni-lj.si/ZalozbaUL/index>

<https://repozitorij.uni-lj.si/info/index.php/slo/>

Digitalna knjižnica Slovenije - dLib.si

DOI: [10.26873/9789612972080](https://doi.org/10.26873/9789612972080)



To delo je objavljeno pod pogoji dovoljenja Creative Commons Priznanje avtorstva – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0 Mednarodno dovoljenje (izjema so fotografije). / This work is licensed under a Creative Commons Attribution--ShareAlike 4.0 International License (except

Katalogni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v

Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

COBISS.SI-ID [172543747](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:si:coibiss-001-0000000172543747)

ISBN 978-961-297-208-0 (PDF)

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
1.1	Sestavni deli sistema CAD/CAM.....	2
1.2	Raznovrstnost keramičnih materialov za računalniško podprto izdelavo	7
1.3	Povzetek	8
2	ZGODOVINA	10
2.1	Razvoj tehnologij CAD/CAM.....	12
2.2	Sodobni sistemi CAD/CAM v zobozdravstvu.....	16
3	DIGITALNO ZAJEMANJE PODATKOV	19
3.1	Neposredno pridobivanje podatkov	20
3.2	Posredno pridobivanje podatkov	21
3.3	Postopek digitalnega zajemanja podatkov.....	22
3.4	Osnovna razdelitev naprav za zajemanje 3D-podatkov	24
3.4.1	Optični 3D-bralniki	24
3.5	Način pridobivanja podatkov optičnih bralnikov	25
3.5.1	Način merjenja s koaksialnim sondiranjem.....	26
3.5.2	Triangulacija.....	26
3.6	Vir svetlobe optičnih bralnikov	27
3.6.1	Strukturirana svetloba.....	28
3.6.2	Laserska projekcija.....	28
3.7	Intraoralni optični bralniki.....	29
3.7.1	Kompletni sistemi CAD/CAM.....	29
3.7.2	Samostojni intraoralni optični bralniki	31
3.7.3	Uporabnost digitalnih optičnih bralnikov.....	32
3.8	Laboratorijski optični bralniki	33
3.9	Programska oprema in potek pridobivanja podatkov	35
3.9.1	Pridobivanje in sestavljanje zajetih podatkov	35

3.9.2	Naknadna obdelava zajetih podatkov v CAD	36
3.10	Točnost optičnih bralnikov.....	38
3.11	Formati datotek pridobljenih podatkov	40
3.12	Povzetek	42
4	RAČUNALNIŠKO PODPRTO OBLIKOVANJE	44
4.1	Digitalno oblikovanje zobnih nadomestkov.....	45
4.2	Digitalno načrtovanje protetične oskrbe	46
4.2.1	Izpolnjevanje delovnega naloga	46
4.2.2	Simulacija okluzije in artikulacije.....	47
4.2.3	Določanje meje preparacije.....	48
4.2.4	Smer vstavitve	49
4.2.5	Oblikovanje notranjosti restavracije.....	50
4.2.6	Oblikovanje zunanosti prevleke.....	50
4.2.7	Digitalne knjižnice zobnih oblik	52
4.2.8	Postavitev zob iz digitalne knjižnice	53
4.2.9	Prosto oblikovanje oz. modeliranje.....	54
4.2.10	Oblikovanje pomanjšane oblike zobnega nadomestka.....	55
4.2.11	Prilagajanje pomanjšane oblike.....	57
4.2.12	Oblikovanje povezav	57
4.2.13	Prosto oblikovanje povezav	58
4.2.14	Združevanje posameznih elementov	59
4.2.15	Lastnosti datotek za odzematno in dodajalno izdelavo	59
4.2.16	Shranjevanje datotek	60
4.3	Povzetek	61
5	RAČUNALNIŠKO PODPRTA IZDELAVA.....	63
5.1	Računalniško podprta izdelava (CAM) v zobozdravstvu	64
5.2	Podatkovni postopki CAM.....	65

5.3	Različni proizvodni pristopi računalniško podprte izdelave	66
5.3.1	Ordinacija	66
5.3.2	Laboratorij	67
5.3.3	Proizvodni center	68
5.4	Izdelava z odvezemalno tehnologijo	69
5.4.1	Vrsti obdelave pri subtraktivni tehnologiji	70
5.4.2	Orodja rezkalnih enot	71
5.4.3	Vrste rezkalnih enot	74
5.4.3.1	Število osi in pravokotni koordinatni sistem (referenčni sistem)	75
5.4.3.2	Vrste obdelave	77
5.4.4	Točnost izdelave CAM	80
5.4.5	Velikost in zmogljivost rezkalnih enot	81
5.4.6	Materiali	82
5.4.7	Zmožnosti in omejitve subtraktivne metode v zobozdravstvu	82
5.5	Izdelava z dodajalno tehnologijo	83
5.5.1	Klasifikacija dodajalnih tehnologij	84
5.5.2	Dodajalne tehnologije v zobozdravstvu	86
5.5.2.1	Ekstrudiranje materialov	88
5.5.2.1.1	Modeliranje s spajanjem slojev (FDM)	88
5.5.2.1.2	Ekstrudiranje termoplastičnih materialov (FFF)	89
5.5.2.2	Fotopolimerizacija v kadi	89
5.5.2.2.1	Stereolitografija (SL)	90
5.5.2.2.2	Projekcija DLP	93
5.5.2.2.3	Tehnologija tekočerkristalnih zaslonov (LCD)	95
5.5.2.3	Kapljično nanašanje ali brizganje	96
5.5.2.3.1	Tehnologija PolyJet	96
5.5.3	Spajanje slojev praškastega materiala	98

5.5.3.1.1	Selektivno lasersko sintranje (SLS).....	98
5.5.3.1.2	Neposredno lasersko sintranje kovine (DMLS)	101
5.5.3.1.3	Popolno taljenje (FM).....	102
5.5.3.1.4	Selektivno lasersko taljenje (SLM)	102
5.5.4	Povzetek	104
6	MATERIALI CAD/CAM	108
5.6	Materiali za rezkane zobne nadomestke v fiksni protetiki.....	109
5.6.1	Steklokeramika z delci	111
5.6.1.1	Feldšpatska keramika.....	111
5.6.1.2	Sintetična keramika.....	111
5.6.1.3	S steklom infiltrirana keramika.....	113
5.6.1.4	Oksidne ali polikristalinične vrste keramike.....	113
5.6.1.5	Keramični kompoziti s polimerno matrico	118
5.7	Materiali za rezkanečasne zobne nadomestke	120
5.8	Materiali za rezkanje totalnih protez	121
5.8.1	Polimetil metakrilat (PMMA)	121
5.9	Materiali za izdelavo z dodajalnimi tehnologijami	122
5.10	Povzetek	124

KAZALO SLIK

Slika 1: Primer strojne in programske opreme za zajemanje podatkov	2
Slika 2: Primer digitalno zajetih podatkov	3
Slika 3: Primer digitalnega posnetka spodnje čeljusti v obliki datoteke STL	4
Slika 4: Orodja za rezkanje in brušenje.	5
Slika 5: Vsestranska petosna rezkalna enota z menjalnikom diskov.....	6
Slika 6: Raznovrstni bloki različnih keramičnih materialov	7
Slika 7: Rezkalna enota PlanMill® 40 in IOS (Planmeca)	13
Slika 8: CEREC inLab® MC X – Sirona	14
Slika 9: Razvoj tehnologij CAD/CAM v zobozdravstvu	15
Slika 10: Primer kombinacije različnih tehnologij zajemanja podatkov	17
Slika 11: Zajete točke 3D-površine, definirane s koordinatami x, y in z	22
Slika 12: Točkovni oblak in žični model.....	23
Slika 13: Intraoralni optični bralnik Medit i500	25
Slika 14: Laboratorijski optični bralnik Dentsply Sirona InEos X5.....	25
Slika 15: Način meritev koaksialnega sondiranja (levo) in triangulacije	25
Slika 16: Način zajemanja s triangulacijo	27
Slika 17: Laboratorijska postavitvev	27
Slika 18: Primer zajemanja površine s strukturirano svetlobo	28
Slika 19: Sirona CEREC AC Omnicam z rezkalno enoto MC XL	30
Slika 20: Trios 3 Pod Dental IOS (3Shape).....	31
Slika 21: Projekcija svetlobe z optičnimi črtami v laboratorijskem optičnem bralniku.....	34
Slika 22: Virtualni model s podrobno zajetimi IDM.....	36
Slika 23: Obdelava zajetih podatkov od točkovnega oblaka do upodabljanja površine	37
Slika 24: Shematična ponazoritev »natančnosti in pravilnosti«	38
Slika 25: Primerjava velikost podatkov neobrezanega in obrezanega virtualnega modela.	39
Slika 26: Različne vrste datotek za prikaz 3D-objekta.....	40
Slika 27: Shematičen prikaz razlike med zapisom datoteke CAD in STL	40
Slika 28: Zajemanje površine v formatu DCM	41
Slika 29: Navadna datoteka STL, zgolj s topografijo površine.....	41
Slika 30: Shematičen prikaz pretoka datotek skozi sistem CAD/CAM	41
Slika 31: Delovni nalog v programski opremi CAD.	47

Slika 32: Okno z orodji virtualnega artikulatorja.....	48
Slika 33: Določanje meje preparacije.....	48
Slika 34: Smer vstavitve in barvna lestvica podvisnih mest	49
Slika 35: Nastavitve parametrov za oblikovanje notranjosti restavracij	50
Slika 36: Funkcija kopiranja zob znotraj istega kvadranta	51
Slika 37: Funkcija zrcaljenja zob	52
Slika 38: Knjižnice oblik zob	53
Slika 39: Predlog zobnega nadomestka za nadaljne modeliranje	54
Slika 40: Barvna lestvica vizualizacije razdalje med digitalno modelacijo	55
Slika 41: Funkcija reduciranja oblike zobnega nadomestka.	56
Slika 42: Izdelava lingvalnih paščkov.....	56
Slika 43: Modelacija ogrodja za kovinsko-porcelansko tehniko	57
Slika 44: Izbira oblike povezav.....	58
Slika 45: Barvna lestvica kot pomagalo pri oblikovanju povezave med dvema prevlekama	58
Slika 46: Združevanje posameznih elementov v posamezno datoteko STL	59
Slika 47: Mini štiri-osna rezkalna enota za ordinacije	67
Slika 48: Kompaktna petosna rezkalna enota za suho in mokro rezkanje	68
Slika 49: Potek oblikovanja odrezkov rezkalnega orodja	71
Slika 50: Nedefiniran potek oblikovanja odrezkov diamanta	71
Slika 51: Rezkalo z dvojnimi robovi in geometrijsko definiranimi rezalnimi robovi.....	72
Slika 52: Različne oblike in velikosti rezkal	72
Slika 53: Diamantni brus z diamantnimi zrnji, vdelanimi v matrico.	73
Slika 54: Površinsko prevlečeni in popolnoma diamantni brus	73
Slika 55: Različne oblike in velikosti brusnih orodij.	74
Slika 56: Primer ozke prevleke oz. nosilca, nedostopnega za orodje CAM.	74
Slika 57: Koordinate treh prostorskih osi x, y in z.....	75
Slika 58: Od štiri- do petosne naprave imajo eno ali več dodatnih, vrtljivih osi.	76
Slika 59: Pet osi, s katerimi lahko orodje doseže vse dele obdelovanca.....	77
Slika 60: Mokra obdelava litijevega disilikata	78
Slika 61: Obdelovanci na opornikih znotraj obdelovalnega surovca.....	80
Slika 62: Nabor podatkov posameznih razrezanih plasti mostička in prevlek.....	83
Slika 63: Pregled obstoječih kategorij postopkov aditivne izdelave.....	85
Slika 64: Primeri izdelkov, narejenih z dodajalnimi tehnologijami.....	87
Slika 65: Shema postopka izdelave z ekstruzijo termoplastov	88

Slika 66: Shematičen prikaz stroja za stereolitografijo	91
Slika 67: Tiskalnik SL Form 2 podjetja Formlabs	92
Slika 68: Shematičen prikaz postopka digitalne obdelave svetlobe (DLP).....	94
Slika 69: UV-osvetlitev čez zaslon LCD pod kadjo za fotopolimer	96
Slika 70: Shematičen prikaz delovanja tehnologije PolyJet.....	97
Slika 71: Splošna shema delovanja tehnologij, ki temeljijo na spajanju slojev praškastega materiala	98
Slika 72: Shema delovanja tehnologije SLS.....	100
Slika 73: Shematičen prikaz postopka izdelave kovinske baze delne proteze v proizvodni enoti SLM.....	103
Slika 74: Primer feldšpatske keramike za fasetiranje ogrodij.	111
Slika 75: Sintetična keramika v blokih.....	112
Slika 76: Blok keramike In-Ceram Alumina CAD/CAM	113
Slika 77: Disk surovca iz cirkonijske oksidne keramike.....	114
Slika 78: Večslojni predbarvani supertranslucentni disk	116
Slika 79: Blok surovca s polimerno matrico in keramičnimi nanodelci.....	119
Slika 80: Hibridna keramika z dvojno keramično-polimerno mrežo	119
Slika 81: Disk PMMA za izdelavo provizorijev	120
Slika 82: Kompozitni disk za izdelavo začasnih restavracij.....	120
Slika 83: CC Disk PMMA Pink	121
Slika 84: Filament, praškasti in tekoči material za izdelavo z dodajalno tehnologijo.....	123

KAZALO TABEL

Tabela 1: Splošen pregled trenutno uporabljenih materialov za subtraktivne tehnologije..	70
Tabela 2: Povzetek razvrstitve in indikacij keramičnih materialov.	110
Tabela 3: Primeri klasičnih vrst cirkonijske oksidne keramike	116
Tabela 4: Primeri prosojnih vrst cirkonijske oksidne keramike	117

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC IN OKRAJŠAV

3D	trirazsežno (ang. <i>Three Dimensional</i>)
3DP	trirazsežni oz. tridimenzionalni tisk (ang. <i>Three-Dimensional Printing</i>)
4K	vodoravna ločljivost zaslona približno 4000 slikovnih pik
ABS	akrilonitril butadien stiren (ang. <i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>)
ASCII	ameriški standardni nabor za izmenjavo informacij (ang. <i>American Standard Code for Information Interchange</i>)
ASTM	Ameriško združenje za testiranje in materiale (ang. <i>American Society for Testing and Materials</i>)
ATZ	z aluminijevim oksidom utrjeni cirkonijev oksid (ang. <i>Alumina-Toughened Zirconia</i>)
AutoFab	avtomatsko izdelovanje (ang. <i>Automated Fabrication</i>)
BJ	kapljično nanašanje ali brizganje veziva (ang. <i>Binder Jetting</i>)
CAD	računalniško podprto oblikovanje (ang. <i>Computer Aided Design</i>)
CAM	računalniško podprta izdelava (ang. <i>Computer Aided Manufacturing</i>)
CBCT	računalniška tomografija s stožčastim snopom (ang. <i>Cone-beam Computed Tomography</i>)
CEREC	ekonomična protetična oskrba zob z estetsko keramiko v ordinaciji (ang. <i>Chairside Economical Restoration of Esthetic Ceramics</i>)
CLIP	zvezna neposredna proizvodnja (ang. <i>Continuous Liquid Interface Production</i>)
CMM	mehanski 3D-bralniki (ang. <i>3D Coordinate Measuring Machine</i>)
CNC	računalniško numerično krmiljenje (ang. <i>Computer Numerical Control</i>)

CT	računalniška tomografija (ang. <i>Computer Tomography</i>)
DCM	neposredna obdelava keramike (ang. <i>Direct Ceramic Machining</i>)
DED	lasersko navarjanje (ang. <i>Direct Energy Deposition</i>)
DICOM	digitalno zajemanje slik in komunikacija v medicini (ang. <i>Digital Imaging and Communication in Medicine</i>)
DMLS	neposredno lasersko sintranje kovine (ang. <i>Direct Metal Laser Sintering</i>)
DLP	digitalna obdelava svetlobe (ang. <i>Digital Light Processing</i>)
DPI	število slikovnih pik na palec (ang. <i>Dots Per Inch</i>)
EBM	taljenje z elektronskim snopom (ang. <i>Electron Beam additive Manufacturing</i>)
FDM	modeliranje s spajanjem slojev (ang. <i>Fused Deposition Modeling</i>)
FEP	fluoriran etilen propilen (ang. <i>Fluorinated Ethylene Propylene</i>)
FFF	ekstrudiranje termoplastičnih materialov (ang. <i>Fused Filament Fabrication</i>)
FFM	ekstrudiranje materialov (ang. <i>Fused Filament Modelling</i>)
FSZ	popolnoma stabiliziran cirkonijev oksid (ang. <i>Fully Stabilized Zirconia</i>)
GDPR	Splošna uredba o varstvu podatkov (ang. <i>General Data Protection Regulation</i>)
IDM	individualni delovni model
IDS	mednarodni zobozdravstveni sejem v Kölnu (ang. <i>International Dental Show</i>)
IOS	intraoralni optični bralnik (ang. <i>Intraoral Scanner</i>)

LCD	tekočekristalni zaslon (ang. <i>Liquid Crystal Display</i>)
LED	svetleča dioda (ang. <i>Light Emiting Diode</i>)
MEM	modeliranje s taljenjem in ekstrudiranjem (ang. <i>Melted and Extruded Modelling</i>)
MIT	Massachusettski inštitut za tehnologijo (ang. <i>Massachusetts Institute of Technology</i>)
MJ	kapljično nanašanje ali brizganje materiala (ang. <i>Material Jetting</i>)
NC	numerično krmiljen (ang. <i>Numerically Controlled</i>)
PA	poliamid ali najlon (ang. <i>Polyamide</i>)
PC	polikarbonat (ang. <i>Polycarbonate</i>)
PEEK	polietereterketon (ang. <i>PolyEther Ether Ketone</i>)
PJP	ekstrudiranje poltekočih termoplastov (ang. <i>Plastic Jet Printing</i>)
PLA	polimlečna kislina (ang. <i>Polylactic Acid</i>)
PPI	število pikslov na palec (ang. <i>Pixels Per Inch</i>)
PSZ	delno stabiliziran cirkonijev oksid (ang. <i>Partially Stabilized Zirconia</i>)
PVA	polivinilacetat (ang. <i>PolyVinyl Acetate</i>)
RM	hitra proizvodnja (ang. <i>Rapid Manufacturing</i>)
RP	hitra izdelava prototipov (ang. <i>Rapid Prototyping</i>)
RPI	računalniško podprta izdelava
RPO	računalniško podprto oblikovanje
RT	hitra izdelava orodij (ang. <i>Rapid Tooling</i>)

SD	standardni odklon (ang. <i>Standard Deviation</i>)
SL	stereolitografija (ang. <i>Stereolithography</i>)
SLA	stereolitografska naprava (ang. <i>Stereo-Litographic Apparatus</i>)
SLM	selektivno lasersko taljenje (ang. <i>Selective Laser Melting</i>)
SLS	selektivno lasersko sintranje (ang. <i>Selective Laser Sintering</i>)
STL	standardni trikotniški jezik (ang. <i>Standard Triangulation Language</i>) ali standardni teselacijski jezik (Standard Tessellation Language)
TEGDMA	trietilen glikol dimetakrilat (ang. <i>Triethylene Glycol Dimethacrylate</i>)
TZP	tetragonalni polikristali cirkonijevega oksida (ang. <i>Tetragonal Zirconia Polycrystals</i>)
UDMA	uretan dimetakrilat (ang. <i>Urethane Dimethacrylate</i>)
UV	ultravijolično valovanje (ang. <i>UltraViolet radiation</i>)
ZTA	s cirkonijevim oksidom utrjeni aluminijev oksid (ang. <i>Zirconia-Toughened Alumina</i>)

1 UVOD

UČNI CILJI

Ob koncu tega poglavja mora bralec:

- razumeti osnovne dele tehnologij CAD/CAM,
- poznati osnovne zmožnosti in prednosti sodobnih tehnologij CAD/CAM,
- poznati osnovne izraze tehnologij CAD/CAM.

Izraz CAD/CAM se v zobozdravstvu pogosto uporablja kot sopomenka za »rezkane« restavracije, vendar to ni povsem pravilno. CAD je okrajšava za »Computer Aided Design« oz. računalniško podprto oblikovanje, medtem ko je CAM kratica za »Computer Aided Manufacturing« oz. računalniško podprto izdelavo. Izraz CAD/CAM ne vsebuje nobene informacije o dejanskem proizvodnem postopku, ki se lahko izvaja odzematno oz. subtraktivno ali dodajalno oz. aditivno.

Tehnologije CAD/CAM so sestavljene iz treh različnih delov:

- **Orodje za digitalizacijo** oz. optični 3D-bralnik pretvori dejansko obstoječo geometrijo predmeta (objekta) v podatkovni niz, ki ga lahko računalniško obdelamo.
- **Programska oprema** za obdelavo podatkov pripravi obstoječi nabor podatkov in ustvari nabor podatkov za izdelek, glede na njegovo uporabo.
- **Proizvodna enota** pridobljeni nabor podatkov pretvori v želeno fizično obliko.

Postopek CAD/CAM vključuje tri korake:

- **pridobivanje** podatkov ali slik;
- **računalniško podprto analizo in oblikovanje** slik oz. podatkov;
- **proizvodnjo** oz. računalniško podprto izdelavo.

Podatki se pridobivajo z različnimi tehnikami, kot so digitalno zajemanje podatkov z optičnimi 3D-bralniki ali digitalno fotografijo. Računalniška programska oprema se uporablja za upodabljanje, analizo in obdelavo slik. Nazadnje se uporabijo rezkalne enote ali 3D-tiskalniki za izdelavo zobnih nadomestkov ali njihovih delov, zasnovanih s CAD.

1.1 Sestavni deli sistema CAD/CAM

Orodje za digitalizacijo

Naprave za digitalni odtis ali optično zajemanje podatkov vključujejo strojno in programsko opremo (Slika 1). Strojna oprema, kot so računalniške kamere ali optični bralniki, omogoča zajemanje digitalnih slik zob in mehkih tkiv ali analognih delovnih modelov ter odtisov. Programska oprema pa je potrebna za obdelavo slik in uporabo pacientovih podatkov.



Slika 1: Primer strojne in programske opreme za zajemanje podatkov (lastni vir).

Prvi intraoralni optični bralec je za svoje delovanje zahteval uporabo prahu, kot je titanov dioksid, ki je omogočil natančno zajemanje digitalnih slik, danes pa so na voljo številni digitalni optični bralniki za uporabo brez prahu. Sprva so bile naprave za intraoralno zajemanje podatkov del ordinacijskih sistemov CAD/CAM (na primer CEREC, E4D Dentist/Planscan), danes pa so naprave za digitalni odtis na voljo kot samostojne naprave.

Prednost digitalnega zajema podatkov je, da uporaba odtisnih materialov in odtisnih žlic ni potrebna, zaradi česar je postopek odtiskovanja do pacientov prijaznejši. Namesto sledenja analognim postopkom se za digitalno zajemanje podatkov uporablja kamera v obliki posebnega držala.

Intraoralni optični bralniki podatke zajemajo z eno od dveh tehnik:

- z ojačano svetlobo (t. i. laserskimi žarki) ali
- z vidno svetlobo (t. i. svetlobnimi žarki).

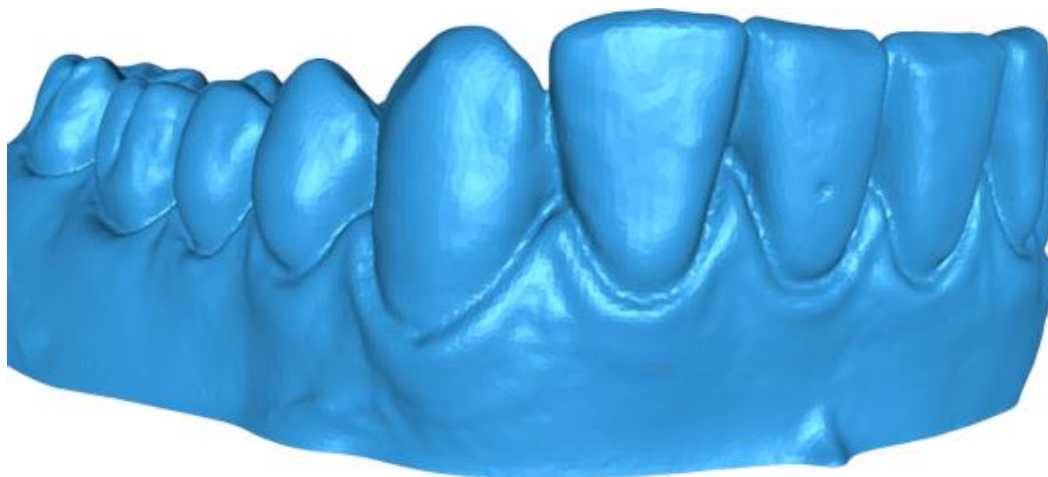
Programska oprema, ki je povezana z optičnimi bralniki, omogoča obdelavo slik v računalniku zobozdravstvene ordinacije ali pa prenos slik po spletu v laboratorij ali rezkalni center. Digitalno zajete podatke (Slika 2) si lahko takoj po zajemu ogledamo na računalniškem zaslonu in jih spremenimo v virtualni model. Možnost takojšnje ocene kakovosti virtualnega modela zobozdravniku omogoča prepoznavanje morebitnih težav, kot so nejasne meje preparacije ali podvisna mesta na obrušeni zobeh. Virtualne modele se lahko nato elektronsko prenese v laboratorij, kjer se uporabijo za pridobivanje tiskanih ali digitalnih delovnih modelov kot del postopka izdelave CAD/CAM izdelkov. Če v zobozdravstveni ordinaciji ne uporabljajo tehnologije za zajem digitalnega odtisa, lahko analogni odtis pošljejo v laboratorij, ki je opremljen z laboratorijskim optičnim 3D-bralnikom.



Slika 2: Primer digitalno zajetih podatkov (lastni vir).

Programska oprema CAD/CAM

Po zajemu podatkov se datoteke digitalnih odtisov običajno shranijo v obliki standardnega teselacijskega jezika (STL) (Slika 3). Različni proizvajalci digitalnih odtisnih naprav pa lahko uporabljajo lastniške različice tovrstnih datotek, ki onemogočajo njihovo uporabo z napravami drugih proizvajalcev (t. i. zaprte sisteme). To zobozdravnike in laboratorije omejuje, da uporabljajo samo eno vrsto računalniškega oblikovanja, programske opreme in proizvodne enote, ki so namenjene le tej digitalni napravi za zajemanje digitalnih odtisov. Na srečo se to spreminja in v zadnjih letih so podjetja za digitalno dentalno tehnologijo razveljavila omejevanje svojih naprav in se prilagodila »odprtemu sistemu«, ki zobozdravnikom in laboratorijem omogoča večjo prilagodljivost glede strojne in programske opreme, ki jo želijo uporabiti. Posledično lahko več zobozdravnikov dela ter sodeluje s številnimi laboratoriji in strokovnjaki, saj niso več omejeni na uporabo določenega sistema tehnologij CAD/CAM, ki ga uporabljajo njihovi kolegi.



Slika 3: Primer digitalnega posnetka spodnje čeljusti v obliki datoteke STL (lastni vir).

Na splošno programska oprema za CAD samodejno predlaga standardno obliko zobnega nadomestka. Predlagano obliko nato laboratorijski zobni protetik izpopolni s postavitvijo cervikalne zapore, določitvijo smeri vstavitve, debelino materiala in prilagoditvijo morfologije. Večina programov uporabnikom omogoča oblikovanje navideznega navoska zobnih nadomestkov na virtualnem modelu, kar olajša natančno načrtovanje zobnih nadomestkov.

Danes programska oprema CAD ponuja tudi različna orodja za dodatne spremembe, vključno s prilagajanjem okluzijskih in aproksimalnih stikov. V zadnjih letih so bile razvite

tudi knjižnice oblik zob CAD, ki zagotavljajo širši nabor oblik zob in tako olajšajo načrtovanje zobnih nadomestkov.

V zobozdravstvu se lahko s tehnologijami in programsko opremo CAD izboljšata produktivnost in kakovost oblikovanja restavracij ter se olajša sodelovanje med člani zobozdravstvenega tima. Obstaja več dentalnih programskih rešitev CAD/CAM, ki imajo različne zmogljivosti in uporabnost, kot so načrtovanje zobnih nadomestkov, ortodontska analiza, kirurško načrtovanje vsadkov in odkrivanje kariesa.

Programska oprema CAD uporabniku omogoča, da oblikuje zobni nadomestek od začetka do konca, pri čemer lahko izvaja enake postopke, ki jih običajno opravi laboratorijski izvajalec analogno, kot so določanje cervikalne zapore, razbremenjevanje podvisnih mest in postavitve zob.

Računalniško podprta izdelava

Stroji za industrijsko računalniško numerično krmiljenje (CNC) uporabljajo različna orodja za vrtanje, žaganje in struženje. V zobozdravstvu pa se v dentalnih rezkalnih enotah za obdelavo materialov uporabljajo orodja za rezkanje in brušenje (Slika 4).



Slika 4: Orodja za rezkanje in brušenje (vir: Interdent).

Obseg uporabe dentalnih rezkalnih enot se lahko razlikuje glede na obseg proizvodnje, ki se giblje od:

- nekaj izdelkov na dan ali teden
- do sto ali tisoč restavracij na teden ali mesec.

Različne naprave imajo tako tudi različne stroške, velikost, proizvodne mehanizme in zmogljivost.

Pri uporabi dentalnih rezkalnih enot se uporablja odvezalna tehnologija, pri kateri se iz bloka materiala odstranjujejo odvečni deli, tako da se oblikujejo oblike in velikosti, ki jih laboratorijski izvajalec določi s programsko opremo CAD. Učinkovitost rezkalnih enot je odvisna od različnih dejavnikov, vključno s številom osi in orodji, ki jih imajo na razpolago. Prvotne rezkalne enote so običajno delovale s tremi ali štirimi osmi in so bile načrtovane za lažjo izdelavo manj zapletenih restavracij. Danes so na voljo laboratorijske rezkalne enote s petimi osmi (Slika 5), ki omogočajo krmiljenje rezkalnega orodja v treh linearnih ravninah ter dveh vrtečih se (rotacijskih) oseh.



Slika 5: Vsestranska petosna rezkalna enota z menjalnikom diskov (vir: Interdent).

V proizvodnih oz. rezkalnih centrih enote CAM uporabljajo pet osi in so običajno večje, hitrejše od manjših enot ter vključujejo robotsko avtomatizacijo za ravnanje z materialom in izdelki. Delujejo tudi z večjo natančnostjo.

Vse bolj pa se v zobozdravstvu uveljavljajo postopki izdelave z dodajalno tehnologijo, predvsem za izdelavo ortodontskih opornic, kirurških vodil, totalnih in implantno podprtih protez ter različnih fiksnoprotetičnih konstrukcij. Medtem ko rezkalne enote odstranjujejo material z rezkanjem, 3D-tiskalnik dodaja material s postopkom slojenja oz. nataljevanja.

1.2 Raznovrstnost dentalnih keramičnih materialov za računalniško podprto izdelavo

V zgodovini dentalnih materialov CAM so prvotno uporabljali material na osnovi glinenčevega porcelana, stisnjen v bloke, npr. Vitablocs Mark I, VITA (Vita Zahnfabrik, Nemčija). Kasneje, v poznih osemdesetih letih, so uvedli keramiko z visoko vsebnostjo stekla Vitablocs II (Vita Zahnfabrik, Nemčija), ki ji je leta 1997 sledil kompozit kot alternativa keramiki, npr. Paradigm MZ100 (3M ESPE, ZDA), ki je sestavljen iz nanodelcev cirkonijeve oksidne keramike, ki krepijo visoko zamreženo polimerno matrico. Od takrat naprej se je pojavilo veliko nekovinskih materialov, ki so trpežni in obenem estetski ter jih je mogoče obdelati po metodah CAM.

Mednje spadajo:

- steklokeramika, npr. LAVA (3M ESPE, ZDA), Cercon (DENTSPLY, ZDA);
- s kompozitno mrežo ojačana keramika, npr. LAVA Ultimate (3M ESPE, ZDA);
- litijev disilikat, npr. IPS e.max CAD (Ivoclar Vivadent, Lihtenštajn);
- oksidne keramike visokih trdnosti (npr. cirkonijeva oksidna keramika).

V zadnjih letih so proizvajalci uvedli nove bloke materialov (Slika 6), ki uporabnikom omogočajo, da naravni videz izdelkov CAM dosežejo z različnimi odtenki v cervikalnem, dentinskem in incizalnem predelu. Primeri takih materialov so:

- IPS e.max CAD Multi (Ivoclar Vivadent, Lihtenštajn),
- Vitablox Triluxe Forte (Vita Zahnfabrik, Nemčija),
- Vitablocs RealLife (Vita Zahnfabrik, Nemčija).



Slika 6: Raznovrstni bloki različnih keramičnih materialov (lastni vir).

1.3 Povzetek

Uporaba dentalne tehnologije CAD/CAM celotnemu zobozdravstvenemu timu omogoča večji nadzor nad postopki protetične oskrbe pacientov, izboljšuje kakovost oskrbe pacientov in zagotavlja pacientu prijaznejši postopek odtiskovanja.

Novi načini dela omogočajo tudi boljše sodelovanje med člani zobozdravstvenega tima, kar prispeva h kakovostni in hitrejši protetični oskrbi pacientov. Postopki, ki so nekoč trajali tedne, so zdaj mogoči v nekaj urah, kar izboljšuje učinkovitost in hitrost izvedbe oskrbe.

Ti postopki dela omogočajo:

- kratkotrajno izdelavo določenih zobnih nadomestkov;
- temeljito načrtovanje zobnih nadomestkov;
- večje vključevanje pacientov v načrtovanje obnove vidnega predela;
- natančnejše in predvidljivejše nadomeščanje zob z vsadki – v primerjavi s klasičnimi postopki.

Za uspešno uporabo tehnologij CAD/CAM potrebujemo veliko znanja na tem področju. V zobozdravstvenem izobraževanju se vse bolj uveljavlja poučevanje digitalnih postopkov za povečevanje kompetenc študentov pri digitalnem oblikovanju in izdelavi zobnih nadomestkov.

V nadaljevanju podrobneje predstavljamo vse tri osnovne dele in tehnološke postopke CAD/CAM, skupaj z zgodovino in materiali, ki so namenjeni uporabi v teh tehnologijah.

Vprašanja:

- Naštej glavne izraze obravnavane tehnologije, zapiši njihove okrajšave in razloži njihov pomen.
- Iz katerih delov sestoji dentalna tehnologija CAD/CAM?
- Naštej in obrazloži postopke dentalne tehnologije CAD/CAM.
- Kaj so naprave za optično zajemanje podatkov in kaj jih sestavlja?
- Katere so prednosti intraoralnega digitalnega zajemanja podatkov?
- Kaj je posledica lastniške različice datoteke STL?
- Katero orodje uporabljajo naprave CNC in katero dentalne rezkalne enote?
- Katere metode izdelave CAM poznaš?
- Katere skupine dentalnih materialov CAM poznaš?
- Katere prednosti prinašajo tehnologije CAD/CAM v zobozdravstvo?

2 ZGODOVINA

UČNI CILJI

Ob koncu tega poglavja mora bralec:

- razumeti zgodovino tehnologij CAD/CAM,
- znati razpravljati o razvoju tehnologij CAD/CAM,
- razumeti možnosti in prednosti sodobnih tehnologij CAD/CAM v zobozdravstvu.

Tehnologije CAD/CAM so bile prvič razvite že v 40-ih letih 20. stoletja za potrebe industrije in inženirstva. Njihov namen je bil olajšati in pospešiti obdelavo kompleksnih delov. Sprva so bile uporabljene v avtomobilski in letalski industriji.

V zobozdravstvu so tehnologije CAD/CAM začeli uporabljati v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja, ko jih je François Duret prvič uvedel na področje protetične oskrbe. Sprva je bil glavni cilj z računalniško vodenimi obdelovalnimi stroji zmanjšati vpliv človeškega dejavnika, spremenljivost postopkov in proizvodne stroške pri izdelavi zobnih restavracij. Čeprav je ta model tehnologije dobro deloval v drugih panogah, je bil temeljni izziv pri uporabi tehnologij CAD/CAM v zobozdravstvu to, da je vsak izdelek oz. restavracija zob unikatna, ker se mora prilagajati zobem in obzobnim tkivom posameznega pacienta. To pomeni, da v zobozdravstvu ni množične proizvodnje enakih izdelkov, ampak gre za izdelavo individualnih zobnih nadomestkov.

V zobozdravstvu zato François Duret velja za pionirja računalniško podprte izdelave zobnih nadomestkov. Že leta 1971 je s sistemom Sophia začel izvajati teoretične in eksperimentalne raziskave na tem področju. Leta 1979 sta Heitlinger in Rodder izvedla prva poskusa računalniško podprte izdelave zobnih nadomestkov s sistemom DentiCAD. Nobeden od omenjenih sistemov pa takrat v zobozdravstvu ni bil širše uveljavljen.

V 80-ih letih prejšnjega stoletja sta dr. Werner Mörmann in Hans Brandestini s sistemom CEREC (Sirona, Nemčija) izpopolnila uporabo tehnologije pri oblikovanju in izdelavi zobnih restavracij. Kratica CEREC pomeni ekonomično protetično oskrbo zob z estetsko keramiko v ordinaciji, ki omogoča takojšnjo izdelavo restavracije ob zobozdravniškem stolu

(ang. *chair-side*). CEREC je bil ordinacijski sistem, ki je omogočal izdelavo keramičnih inlejev z računalniško podprto tehnologijo.

Začetni poskusi izdelave zobnih restavracij s sistemom CEREC so naleteli na težave pri oblikovanju podrobne okluzijske morfologije in zagotavljanju sprejemljive cervikalne zapore. Prve restavracije CEREC so bile iz toplotno obdelanega kompozitnega materiala in so bile v zob pritrjene s cementom na osnovi umetne smole. Zgodnje študije teh restavracij so pokazale razgradnjo kompozitnega robu inleja, kar pa se je izboljšalo s prehodom na keramiko kot materialom za izdelavo inlejev.

S sistemom CEREC je bil dosežen velik napredek v tehnologiji CAD/CAM v zobozdravstvu. Sistem je omogočal intraoralni zajem podatkov obrušeni zob z intraoralno kamero ter oblikovanje in izdelavo keramičnega inleja iz trdnega bloka keramičnega materiala z majhnim rezkalnim strojem v zobozdravstveni ordinaciji. CEREC je bil prvi operativni sistem, ki je lahko izdelal keramično restavracijo istega dne.

Dr. Matts Andersson je leta 1983 razvil sistem CAD/CAM (NobelProcera® CAD/CAM System, Nobel Biocare), ki je omogočal izdelavo rezkanih titanovih konstrukcij. Zaradi visokih cen zlata v osemdesetih letih prejšnjega stoletja so v zobozdravstvu vse bolj uporabljane postale neplemenite zlitine. Pri nekaterih od teh zlitin pa so se pojavili alergijski odzivi pacientov na nikelj, pa tudi nevarnost izpostavljenosti laboratorijskega izvajalca toksičnosti berilija. Dr. Andersson je kot odgovor na te negativne stranske učinke predlagal uporabo titana. Ker so bile tradicionalne tehnike za ulivanje titana težavne, je predlagal izdelavo titanovih konstrukcij in kompozitnih prevlek s tehnologijami CAD/CAM. To je pripeljalo do razvoja uspešnega komercialnega proizvodnega sistema CAD/CAM NobelProcera, pri katerem so digitalno zajeli podatke obrušeni zob, virtualno oblikovali titanova ogrodja, ki so jih izdelali s tehnologijo rezkanja. Istočasno so za izdelavo prevlek v rezkalnih enotah večjih proizvodnih obratov začeli uporabljati polnokeramične materiale. Ta koncept povezanih proizvodnih sistemov se je razširil in so ga nato uporabila številna podjetja.

Leta 1989 je DCS Dental AG iz Švice predstavil sistem Precident, ki je uporabljal vodno hlajenje za obdelavo kovin in gosto sintranega cirkonijevega oksida. V letu 1993 pa je Jef van der Zel predstavil sistem Cicero podjetja Cicero Dental Systems B.V. iz Nizozemske, ki je bil načrtovan za popolno digitalno izdelavo keramičnih prevlek in mostov.

V zgodovini digitalne tehnologije izdelave zob je bil odločilen korak tudi uvedba sistema za računalniško podprto obdelavo oksidne keramike visokih trdnosti Cercon Smart Ceramics (DeguDent GmbH, danes Dentsply Sirona, Hanau, Nemčija). Ta sistem je prvič omogočil rezkanje cirkonijeve oksidne keramike v predhodno sintrani fazi s povečano geometrijo, ki se nato med postopkom sintranja skrči za določeno vrednost. Ta revolucionarni postopek, znan kot neposredna obdelava keramike ali postopek DCM (ang. *Direct Ceramic Machining*), sta razvila züriški profesor protetike Peter Schärer z univerzitetne klinike v Zürichu in profesor Ludwig J. Gauckler s svojo raziskovalno skupino z Inštituta za nekovinske anorganske materiale pri ETH Zürich.

V zgodnji fazi razvoja tehnologij CAD/CAM so bili njihovi sistemi omejeni na izdelavo posameznih restavracij, kot so inleji, onleji in prevleke. Takratna strojna in programska oprema sta omogočali le dvorazsežno sliko optično prebranih objektov, saj zmogljivost pripadajočega računalnika ni dopuščala shranjevanja podatkov, ki so bili potrebni za 3D-prikaz.

2.1 Razvoj tehnologij CAD/CAM

V zadnjih letih se je na trgu pojavilo veliko proizvajalcev, ki ponujajo tehnologije CAD/CAM ter njihove komponente za zobozdravstvene ordinacije in laboratorije. Strojna oprema vključuje optični 3D-bralnik, računalnik in proizvodno opremo, kot je rezkalna enota ali 3D-tiskalnik, za izdelavo končnih izdelkov.

Čeprav se obdelava podatkov in oblikovanje dokončata s programsko opremo CAD, zahteva sama izdelava dodatno programsko opremo CAM, ki omogoča popolnoma avtomatizirano izdelavo. S sodobno programsko opremo CAM lahko s specifičnimi parametri, kot so izbrani material in način izdelave, oblikujemo raznolike zobne nadomestke. To omogoča povečano učinkovitost, nadzor nad procesi in izboljšano ekonomičnost.

V zobozdravstvu se tehnologije CAD/CAM uporabljajo na več načinov, od kompletnih sistemov za zajemanje podatkov, oblikovanje in rezkanje do posameznih komponent, ki opravljajo le posamezne funkcije, kot so zajemanje podatkov, oblikovanje ali rezkanje oz. tiskanje restavracij. To omogoča izdelavo zobnih nadomestkov v treh različnih okoljih:

- na napravah v ordinaciji,
- v zobnih laboratorijih,
- v rezkalnih centrih.

Primer kompletnega sistema CAD/CAM, ki omogoča izdelavo takojšnjih restavracij v zobozdravstveni ordinaciji, je E4D Dentist System iz leta 2008, ki se zdaj imenuje Planscan (Planmeca, Finska). Njegova izstopajoča inovacija je bila edinstven in odprt sistem, ki omogoča povezovanje različnih delov tehnologije CAD/CAM. Ta sistem (Slika 7) omogoča kombiniranje različnih komponent, kot so digitalni optični bralnik, programska oprema CAD in rezkalna enota, prilagojeno željam uporabnika.



Slika 7: Rezkalna enota PlanMill® 40 in IOS (Planmeca) (lastni vir).

Primeri drugih znanih dentalnih sistemov CAD/CAM v zobozdravstvu so:

- CEREC® AC (Sirona, Nemčija),
- LAVA™ COS (3M ESPE, ZDA),
- iTero® (Cadent ZDA) in
- Trios (3Shape, Danska).

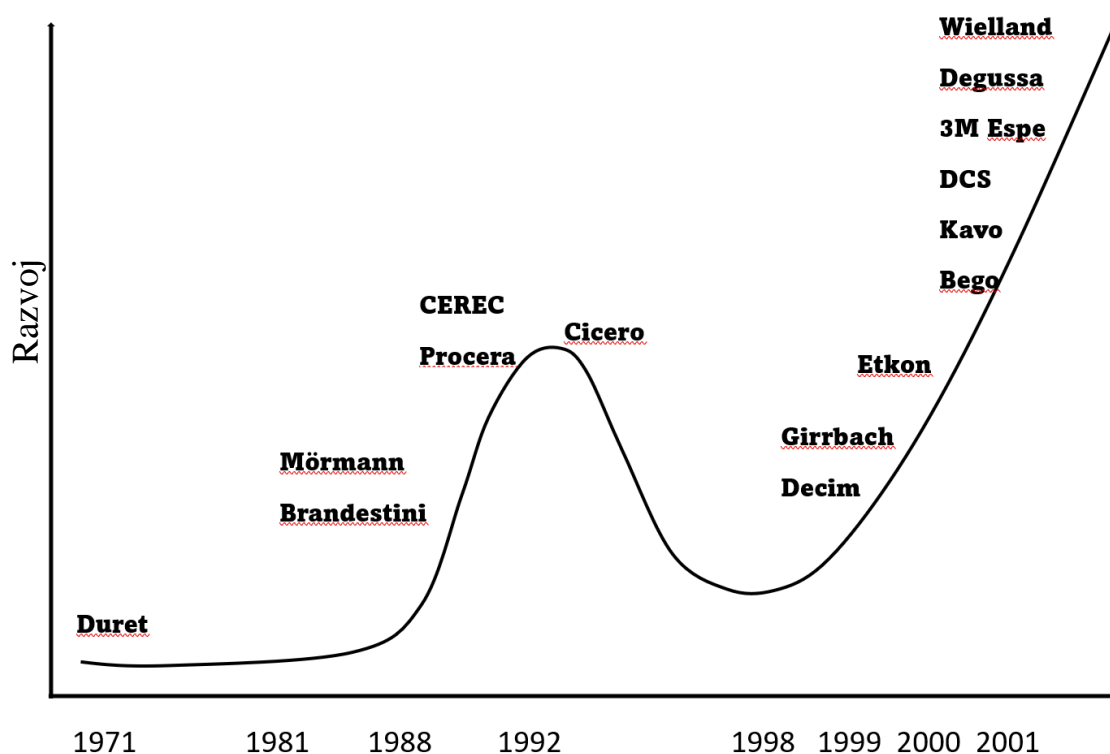
CEREC AC ima vgrajeno programsko opremo CAM, medtem ko se LAVA COS, iTero in Trios štejejo za samostojne naprave za digitalno odtiskovanje. Za laboratorije je na voljo tudi rezkalna enota CEREC inLab® MC XL in MC X (Slika 8).



Slika 8: CEREC inLab® MC X – Sirona (lastni vir).

Karl Grrrbach velja za enega vodilnih ljudi v razvoju tehnologij CAD/CAM v zobozdravstvu. Leta 1999 je njegovo podjetje Grrrbach Dental GmbH (Pforzheim, Nemčija) predstavilo sistem CAD/CAM Digident, ki je bil osupljiv zaradi možnosti obdelave različnih materialov z uporabo vodnega hlajenja. Na mednarodni zobozdravstveni razstavi IDS 2001 so bili predstavljeni številni drugi sistemi CAD/CAM, med drugim Everest (KaVo, Leutkirch, Nemčija), Etkon (Etkon AG, Gräfelfing, Nemčija) in Lava (3M Dental AG, Seefeld, Nemčija). V naslednjih letih je vse več proizvajalcev dentalne opreme v svoj nabor dodajalo tehnologije CAD/CAM. Med nadaljnjimi mejniki na tem področju (Slika 9) je Bego Medifactory System (Nemčija), ki je bil uveden leta 2002 in temelji na tehnologiji selektivnega laserskega taljenja, razvili so ga Schweiger, Beuer in Eichberger, na trgu pa je bil predstavljen leta 2009/2010.

Na področju digitalnega intraoralnega 3D-zajemanja sta se poleg bralne enote CEREC pojavila še sistem Lava COS (ZDA) (2009) in Straumann Cadent i Tero (ZDA) (2010). Nadaljnji sistemi so bili uvedeni leta 2011, 2013 in 2015, največji poudarek pa je bil namenjen optičnemu bralniku Trios (3Shape, København, Danska).



Slika 9: Razvoj tehnologij CAD/CAM v zobozdravstvu (prirejeno po prof. Mehlu).

Razlogov za hiter razvoj tehnologij CAD/CAM je več, zato je težko določiti pglavitnega. Kot gonilna sila vsakega inovativnega razvoja v zgodovini človeštva je vprašanje »Kako nekaj deluje?« odigralo pomembno vlogo tudi v zobozdravstvu. Eden od odločilnih vzrokov za izjemno rast digitalnih proizvodnih tehnologij na tem področju so materiali, ki se uporabljajo v zobni protetiki. Zahteve glede materialov, ki se lahko uporabljajo v ustni votlini, znatno omejujejo razpoložljive skupine materialov, pri čemer obdelava ustreznih materialov pogosto povzroča težave. Do zdaj oksidne keramike visokih trdnosti v običajnih zobozdravstvenih postopkih, ki vključujejo tehnologije precizijskega litja zlitin in stiskanja keramike, ni bilo mogoče obdelati. Ko pa so se znanstveniki prepričali o pozitivnih lastnostih določenega materiala, so poskušali najti način, da bi bil ta novi material uporaben za obdelavo oz. predelavo. Takratna rešitev je bila subtraktivna obdelava blokov ali diskov materiala različnih oblik s tehnologijo CNC. Zagotovo pa brez materiala, kot je cirkonijev oksid (ZrO_2), ne bi bilo zmagovitega pohoda tehnologij CAD/CAM, saj se druge skupine materialov lahko oblikuje tudi z drugimi klasičnimi tehnologijami. Upravičeno lahko trdimo, da je bil cirkonijev oksid pglavitni razlog za širjenje izdelave zobnih nadomestkov, podprte s tehnologijami CAD/CAM. Ob tem se je pokazalo tudi, da s takim načinom obdelave

cirkonijeve oksidne keramike povečamo produktivnost, obenem pa lahko na enak način obdelujemo tudi druge vrste keramike, kar je povečalo nabor materialov.

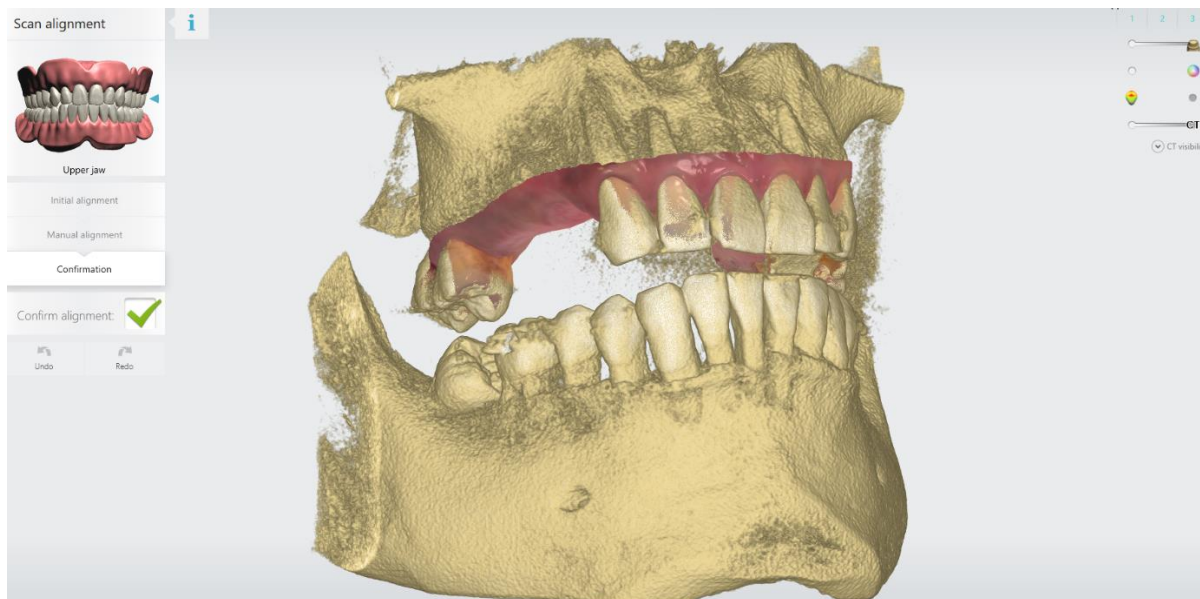
Podobno kot v industriji tudi v zobozdravstvu postopki postajajo vse bolj avtomatizirani. Cena zobozdravstvenih storitev pri tem pri načrtovanju oskrbe pacienta postaja ključna. Avtomatizacija lahko prispeva k učinkovitejši in ekonomičnejši proizvodnji zobnih nadomestkov z visoko kakovostjo. Zaradi stalnega razvoja strojne in programske opreme je že danes izdelava posameznih zobnih nadomestkov s tehnologijami CAD/CAM ekonomičnejša. Posledično se je v zadnjih letih delež računalniško podprte izdelave zobnih nadomestkov povečal in enote CAM so na voljo kot del storitev, ki jih ponujajo zobozdravstvene ustanove.

Tudi v prihodnosti bo nadaljnji razvoj programske in strojne opreme omogočal obdelavo novih materialov ter spodbujal nadaljnjo širitev uporabnosti tehnologij CAD/CAM.

Digitalne tehnologije kažejo, da bo razvoj v zobozdravstvu usmerjen predvsem v model povsem digitalnega delovnega postopka (ang. *Digital Workflow*).

2.2 Sodobni sistemi CAD/CAM v zobozdravstvu

Danes sistemi CAD/CAM uporabnikom omogočajo, da protetične restavracije oblikujejo in izdelajo v kratkem času, kar je v primerjavi s časom, ki je bil za to potreben še pred nedavnim, velik napredek. V zobozdravstvu postajajo vse pomembnejše še druge tehnologije, kot je računalniška tomografija, še posebej v kombinaciji z digitalnimi intraoralnimi odtisi (Slika 10) in tehnologijo zajemanja 3D-podobe obraza. Zaradi stalnih izboljšav strojne in programske opreme za računalniško tomografijo s stožčastim snopom (CBCT) postaja tehnologija uporabnejša tako v zobni protetiki kot na specializiranih področjih implantologije ter čeljustne in zobne ortopedije.



Slika 10: Primer kombinacije različnih tehnologij zajemanja podatkov (lastni vir).

Postopki CAD/CAM omogočajo sodobno izvedbo ortodonskega zdravljenja, kjer se skoraj vsaka faza zdravljenja vnaprej virtualno pripravi, preden se začne dejansko premikanje zob z opornicami.

Bistvene prednosti sodobne računalniško podprte izdelave zobnih nadomestkov so:

- dostop do novih, tovarniško pripravljenih materialov za izdelavo restavracij;
- izboljšanje kakovosti, ki je povezano s standardiziranimi postopki;
- možnost shranjevanja zapletene zbirke podatkov, kar omogoča preprosto ponovljivost;
- povečana uspešnost zdravljenja zaradi razširjenih možnosti načrtovanja.

Vprašanja:

- Kdaj in s kakšnim namenom je bila razvita prva tehnologija CAD/CAM?
- Kdo in kdaj je tehnologijo CAD/CAM prvič predstavil zobozdravstvu?
- Opiši prvi uporabni sistem tehnologije CAD/CAM v zobozdravstvu ter njegove pomanjkljivosti.
- Opiši evolucijo oz. razvoj tehnologij CAD/CAM v zobozdravstvu.
- V katerih okoljih je danes mogoča izdelava CAM zobnih nadomestkov?
- Kje so razlogi za hiter razvoj tehnologij CAD/CAM v zobozdravstvu?
- Kje vidiš možnosti za razvoj tehnologij CAD/CAM v prihodnosti?
- Katere so bistvene prednosti sodobne izdelave CAM zobnih nadomestkov?
- Kaj omogoča sodobna dentalna tehnologija CAD/CAM?

3 DIGITALNO ZAJEMANJE PODATKOV

UČNI CILJI

Ob koncu tega poglavja mora bralec:

- razumeti tehnologijo CAD/CAM za digitalno zajemanje podatkov;
- znati razlikovati lastnosti različnih tipov digitalnih optičnih bralnikov;
- znati razložiti uporabo tako samostojnih kot sistemskih digitalnih optičnih bralnikov CAD/CAM in njihove programske opreme.

V zobozdravstvu odtiskovanje pomeni postopek, s katerim pridobimo podatke o stanju v pacientovih ustih. Z odtisom jih prenesemo v zobni laboratorij z namenom izdelave posrednih protetičnih izdelkov. Ta postopek je ključnega pomena za zagotavljanje natančnih, funkcionalnih in estetskih zobnih nadomestkov.

V zobozdravstvu kljub izboljšavam natančnosti elastomernih materialov za zajemanje odtisov, kot so vinil polisiloksani, in polieter, s tradicionalnimi tehnikami odtiskovanja pogosto ne dosežemo popolne natančnosti pri reprodukciji stanja v ustih. Napake se lahko pojavijo tako pri odtiskovanju v zobozdravstveni ordinaciji kot pri izdelavi modelov v laboratoriju. Poleg tega sta tu še nelagodje pacientov in zamudnost postopka, kar lahko vodi do dodatnih težav in nepredvidljivosti pri izdelavi zobnih nadomestkov, ki jih je včasih treba celo izdelati znova.

Odtiskovanje lahko pri pacientu povzroča nelagodje (na primer žrelni refleks in tesnobo). Poleg tega odtisni materiali v ustni votlini lahko reagirajo z določenimi snovmi. Za popolno strjevanje odtisnih materialov je pogosto potrebnih več minut, da se zajamejo podrobnosti tako trdega kot mehkega tkiva ustne votline. Za izdelavo pravilno prilegajočih se zobnih nadomestkov pa so potrebni tudi drugi podatki, na primer odtisi nasprotnega zobnega loka in registracija pacientovega medčeljustnega odnosa.

Odtise je nato treba poslati v laboratorij za izdelavo mavčnih modelov – ob predpostavki, da so brez napak, kot so praznine, poke ali mehurčki, ki bi lahko vplivale na kakovost izdelanih zobnih nadomestkov. Tudi pri izdelavi delovnih mavčnih modelov in natančnem določanju meje preparacije lahko pride do napak.

Uvedba digitalnega zajemanja podatkov neposredno pri pacientu ali laboratorijskega zajemanja 3D-podatkov odpravlja številne problematične postopke, povezane z izdelavo tradicionalnih analognih odtisov in modelov. Uporaba digitalnega zajema podatkov v kombinaciji z računalniško podprtim oblikovanjem (CAD) in postopki računalniško podprte izdelave (CAM) zobozdravnikom in laboratorijskim izvajalcem omogoča uporabo novih, a preizkušenih materialov za izdelavo zobnih nadomestkov, ki zagotavljajo natančnejše prilaganje, anatomsko obliko, videz in trdnost.

Digitalni odtisi so natančni in neodvisni od dejavnikov, kot so izkrivljanje materiala, neustrezne tehnike izdelave modelov, nenatančno obrezovanje in določanje meje preparacije. Digitalni optični bralniki nadomeščajo tradicionalne analogne odtisne materiale in tehnike, saj omogočajo natančno in učinkovito zajemanje ter reprodukcijo bistvenih kliničnih podatkov.

Z digitalnim zajemanjem podatkov neposredno pri pacientu je postopek »odtiskovanja« postal učinkovitejši in ekonomičnejši, kar je za zobozdravstvene ordinacije in zobne laboratorije zelo pomembno. Zbirka digitalnih odtisov lahko postane del pacientove kartoteke, ki se deli med člani zobozdravstvenega tima, vključno s protetiki, oralnimi kirurgi, parodontologi in laboratorijskimi zobnimi protetiki. To omogoča skupno načrtovanje zdravljenja in oskrbe na povsem nov način. Poleg tega lahko skoraj vse vrste zobnih nadomestkov oblikujemo in izdelamo na podlagi digitalnega odtisa.

Kljub uporabi digitalnega zajemanja podatkov ostajata preparacija in tehnika odmika dlesni ključnega pomena za uspešnost in predvidljivost tako analognih kot digitalnih postopkov.

Razumevanje tehnologije digitalnega zajemanja podatkov ter njenih možnosti in vlog v nastajajočih digitalnih postopkih dela je pomembno za vključevanje tega orodja ter povečevanje natančnosti in učinkovitosti v zobni protetiki.

3.1 Neposredno pridobivanje podatkov

Z intraoralnim optičnim bralnikom (IOS) dosežemo zajem digitalnih podatkov v samo enem koraku, ker se podatki prenesejo neposredno iz ust v programsko opremo CAD. Ta način se imenuje »digitalni intraoralni zajem podatkov« oz. »digitalno odtiskovanje«. Na podlagi pridobljenih podatkov je poleg virtualnega modela mogoče izdelati tudi dejanski delovni

model s postopki subtraktivne ali aditivne izdelave. Ta digitalni postopek poenostavlja določene klasične delovne postopke v zobni protetiki. Standardizacija tega postopka poveča učinkovitost in kakovost zajema podatkov pri pacientu.

Prednosti IOS:

- sprejemljivost za pacienta,
- popravljivost odtisa;
- ponovljivost podatkov;
- novi načini odkrivanja kariesa;
- neprekinjen digitalni postopek;
- manj dejavnikov, ki vplivajo na postopek;
- standardiziranost in ponovljivost postopka;
- neposreden nadzor nad preparacijo;
- prihranek časa oz. učinkovitost zaradi neposredno pridobljenega virtualnega modela;
- poenostavljena komunikacija med zobozdravnikom in laboratorijskim izvajalcem.

Glavna prednost uporabe IOS je možnost neposrednega nadzora kakovosti preparacij. Takoj po uporabi IOS se pridobi trirazsežni pogled na stanje, ki zobozdravniku omogoča preverjanje obrušenih zob in popravljanje neustreznih delov brušenega zoba. Skoraj vsa programska orodja za IOS prikazujejo podvisna mesta in zobozdravnikom ponujajo možnost ponovnega brušenja zob, preden se digitalni odtis ponovi.

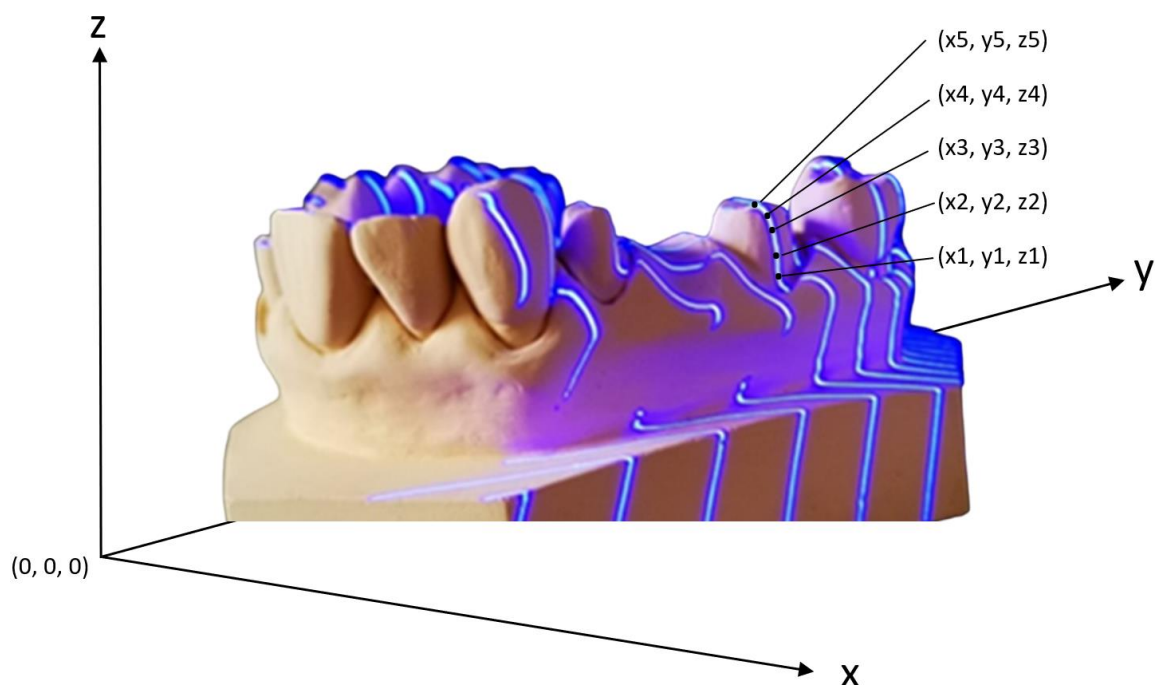
3.2 Posredno pridobivanje podatkov

Pridobivanje podatkov o stanju pacientovih zob in drugih struktur ustne votline je prvi korak vsakega protetičnega postopka, ki se lahko izvede z analognimi ali digitalnimi tehnikami. Pri izdelavi zobnega nadomestka s tehnologijo CAD/CAM zato najprej pridobimo virtualni delovni model. V primeru klasičnega odtisa se izdelani mavčni model digitalizira z laboratorijskim optičnim bralnikom, kar je znano tudi kot »posredni digitalni postopek dela« ali »delno digitalni zajem podatkov«. Postopek do oblikovanja CAD zobnega nadomestka v tem primeru sestavljajo trije koraki:

- odtiskovanje,
- izdelava modela in
- skeniranje modela.

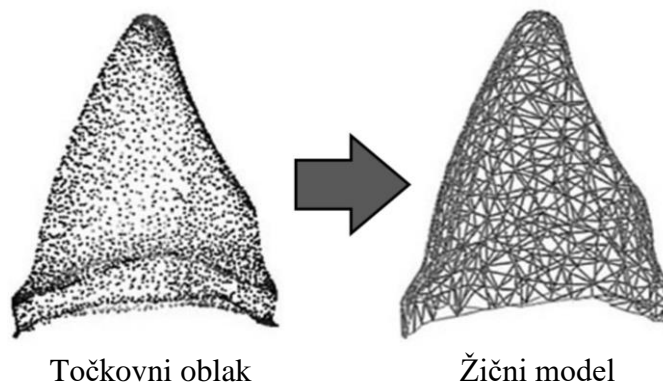
3.3 Postopek digitalnega zajemanja podatkov

Optični bralnik, znan tudi kot površinski digitalizator, je naprava, ki omogoča zajemanje podatkov 3D-površin. Snemanje topografskih značilnosti zob in odtisov v numerični obliki temelji na koordinatnem sistemu, ki zagotavlja notranjo volumetrično referenco, kjer ima vsaka točka površine definirane koordinate x , y in z v trirazsežnem prostoru (Slika 11).



Slika 11: Zajete točke 3D-površine, definirane s koordinatami x , y in z (lastni vir).

Optični 3D-bralnik ustvari niz koordinat x - y - z , ki opisujejo površino predmeta, ki ga zajema v postopku branja. Ta niz koordinat se imenuje točkovni oblak (Slika 12). Točkovni oblak se matematično obdela za rekonstrukcijo zunanjih obrisov zajetega predmeta. Obrisi so narejeni iz ločenih lokacij točk, ki so med sabo povezane s črto in se zato pogosto imenujejo žični modeli.



Slika 12: Točkovni oblak in žični model (lastni vir).

Zaradi kompleksne oblike obrušenih zob, sosednjih nebrušenih zob in okoliških tkiv optični bralnik pogosto ne more digitalizirati celotnega zobnega loka v enem posnetku. Namesto tega se objekt zajame z različnih zornih kotov in iz vsakega posameznega kota se pridobi točkovni oblak, ki se jih nato združi v en sam pogled. Poleg matematične obdelave podatkov je glavna težava določitev razdalje med notranjim koordinatnim sistemom naprave in dejansko površino zob. Za ta namen so bile razvite različne metode pridobivanja digitalnih podatkov, ki jih lahko na splošno razdelimo na »stične« in »nestične«, odvisno od uporabljene tehnologije.

Stične metode

Pri »stični metodi« se trdno kovinsko ali rubinasto kroglico uporabi za sledenje površini predmeta, zato so taki bralniki opredeljeni kot stični bralniki s tipali na dotik. Te naprave so načrtovane tako, da vedno uporabljajo zelo nežen pritisk na predmete, da se s tem izognejo morebitni poškodbi površin. Čeprav so zelo natančne, so razmeroma počasne in niso primerne za intraoralno rabo ter se danes štejejo za zastarelo tehniko.

Nestične metode

Druga metoda vključuje nestični optični bralnik, ki se največkrat uporablja po načelu triangulacije, pri čemer se za zajem podatkov uporablja projekcija svetlobnega vira. Za pridobivanje digitalnih 3D-modelov se uporablja več korakov. Najprej se fizične lastnosti objekta opišejo z računalniškimi matematičnimi postopki in poligonalno mrežo, ki je sestavljena večinoma iz trikotnikov. Nato se tej mreži doda senčenje in osvetlitev, kar 3D-objektu doda resničnost videza. Zadnji korak se imenuje upodabljanje, pri katerem računalnik razpoložljive (zajete) podatke pretvori v resničnosten 3D-objekt.

3.4 Osnovna razdelitev naprav za zajemanje 3D-podatkov

Osnovna razlika pri napravah za zajemanje 3D-podatkov je otipno (mehansko) ali optično delovanje. Prvotni laboratorijski optični bralniki za digitalni zajem podatkov s površine predmetov so uporabljali tipne sonde, danes pa se večinoma uporablja svetlobna projekcija (npr. laserska ali črtasta svetloba), ki se projicira na predmet, senzorji pa nato podrobnosti projekcije zajamejo in s triangulacijo pretvorijo v 3D-sliko.

3.4.1 Optični 3D-bralniki

Optični bralniki so naprave, ki s skeniranjem površine predmetov omogočajo njihov trirazsežni prikaz na zaslonu računalnika. Z optičnimi bralniki lahko pridobimo podatke o površini predmetov v obliki točkovnih oblakov, ki so dokumentirani v univerzalnem formatu ASCII.

Zmogljivost in uporaba intraoralnih (Slika 13) in laboratorijskih optičnih bralnikov (Slika 14) sta odvisni od vrste kamere in načina pridobivanja podatkov, vira svetlobe, odprtosti sistema (zaprti ali odprti) ter od tega, ali so samostojni sistemi za digitalni zajem podatkov ali so sestavni del kompletnega dentalnega sistema CAD/CAM. Funkcije in prednosti naprav za digitalno zajemanje podatkov se med sabo razlikujejo, kar vpliva na način njihove uporabe in funkcionalnost.

Med pomembne lastnosti optičnih bralnikov spadajo tudi velikost intraoralnega bralnika, velikost laboratorijskega bralnika in delovanje kamere, zahteve glede nanašanja prahu, način optičnega branja ter zajemanje barv.



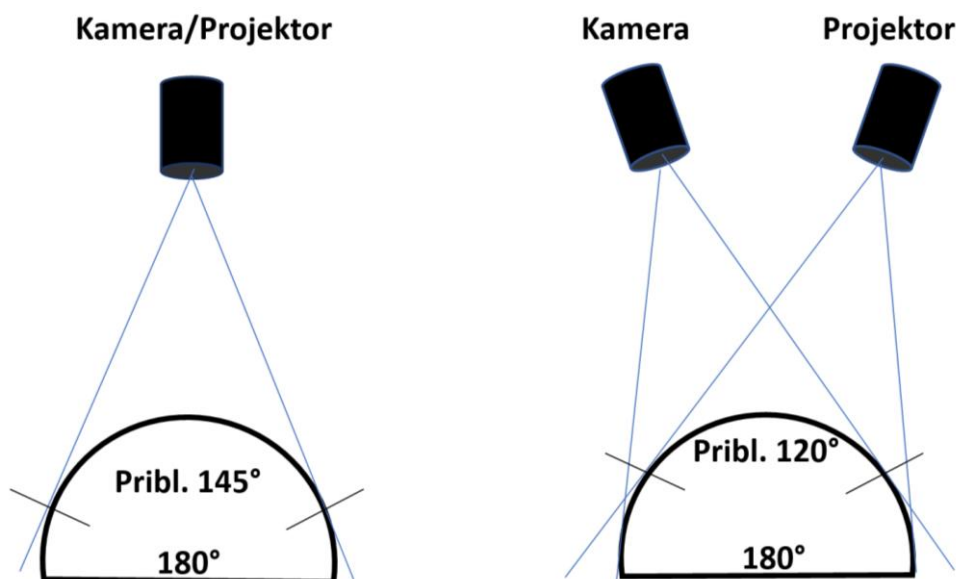
Slika 13: Intraoralni optični bralnik Medit i500 (vir: Interdent).



Slika 14: Laboratorijski optični bralnik Dentsply Sirona InEos X5 (vir: Interdent).

3.5 Način pridobivanja podatkov optičnih bralnikov

Optični bralniki se razlikujejo glede na način pridobivanja podatkov po koaksialnem sondiranju (ang. *coaxial*: z isto osjo) in triangulaciji (latinsko *triangulum*: trikotnik). Glavna razlika med metodami je v tem, da različni merilni načini uporabljajo različne kote zajemanja (Slika 15). Pri tem je kot zaznavanja koaksialnega sondiranja precej večji.



Slika 15: Način meritev koaksialnega sondiranja (levo) in triangulacije (desno) (lastni vir).

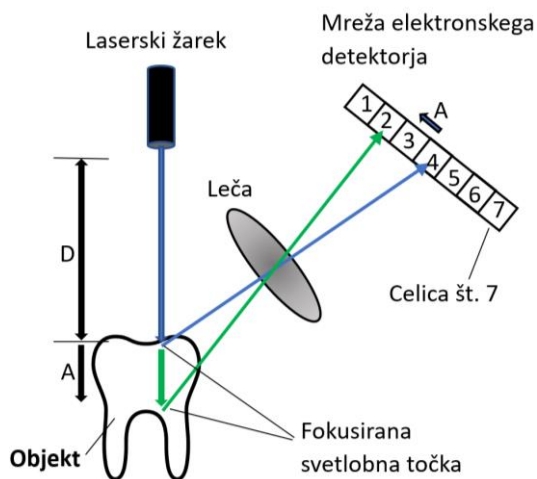
3.5.1 Način merjenja s koaksialnim sondiranjem

Tehnologija s koaksialnim sondiranjem deluje po načelu, da je kamera usmerjena na točko na površini predmeta. Položaj goriščne ravnine leče (vrednost z) je znan, medtem ko se vrednosti x in y zajamejo med snemanjem, kar omogoča določanje prostorskih koordinat za vse točke v goriščni ravnini. V naslednjem koraku se goriščna ravnina premakne za znano razdaljo v smeri z in določijo se naslednje goriščne točke površine. Ta postopek se ponavlja, dokler ni zajeta celotna površina, pri čemer se slika zajame plast za plastjo. Prostorske koordinate vseh izmerjenih površinskih točk tvorijo 3D-sliko objekta.

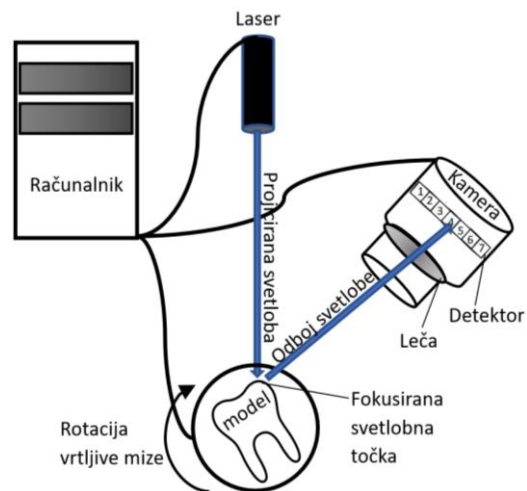
3.5.2 Triangulacija

Triangulacija je metoda, pri kateri se z določitvijo položaja triangulacijske točke na podlagi trikotniških pravil in dveh točk z znanima koordinatama določi lega objekta, ki ga je treba izmeriti. Pri tej metodi se na predmet projicira različne strukturirane svetlobne elemente, kot so točke, črte ali zapletenejši vzorci. Medtem ko vir svetlobe projicira točko, črto ali vzorec na predmet, kamera zazna površino predmeta in lokacijo svetlobe. Z elektronskim pretvornikom slike visoke ločljivosti lahko dosežemo sprejemljivo natančnost skeniranja površine objekta v območju desetih mikrometrov.

Triangulacija se lahko prikaže na način, predstavljen na Sliki 16. Na površino projiciramo majhno točko lasersko generirane svetlobe, ki jo nato zajamemo s posebno kamero. Kamera vsebuje lečo in mrežo elektronskih detektorjev, ki omogočajo izostritev točke na sredini detektorske mreže (na primer v celici št. 4), če se ta pojavi na razdalji »D« od vira svetlobe. Če je površina bližje kameri, se točka usmeri na celico št. 5, če je površina odmaknjena dlje od kamere, pa bi se usmerila na celico št. 3. Položaj leče med postopkom triangulacije ostane nespremenjen, vendar se vsaka sprememba razdalje med lečo in površino odrazi v drugi detektorski celici, ki jo aktivira fokusirana svetlobna točka. Detektorji, ki se uporabljajo za triangulacijo, so podobni tistim v digitalnih fotoaparatih in so tehnološko zapletene elektronske naprave. Z mehanskim povečevanjem ali zmanjševanjem višine žarka (po koordinati z na Sliki 11) lahko zajamemo celotno topografijo površine.



Slika 16: Način zajemanja s triangulacijo (lastni vir).



Slika 17: Laboratorijska postavitvev (lastni vir).

Slika 17 prikazuje tipično laboratorijsko postavitvev optičnega 3D-bralnika, ki vključuje vir svetlobe, predmet in detektor. Predmet, ki je običajno mavčni model, je postavljen na večosni rotacijski mehanizem, kar optičnemu žarku omogoča dostop do vseh vidnih površin. Za natančno uporabo in sinhronizacijo vseh komponent optičnega 3D-bralnika pa skrbi visokozmogljiv računalnik, ki deluje skupaj s programsko opremo.

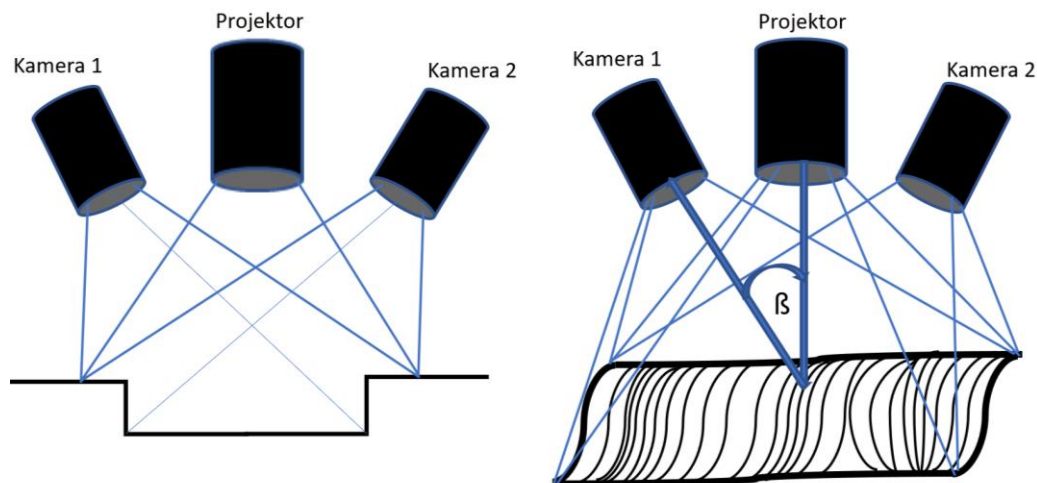
3.6 Vir svetlobe optičnih bralnikov

Digitalni optični bralniki so naprave, ki za zajemanje 3D-slik zob in okoliških tkiv uporabljajo laserje ali strukturirano svetlobo. Glede na nalogo lahko uporabljajo različne svetlobne vire za projekcijo svetlobe, na primer laserske vire ali svetlobne vire iz barvnega spektra vidne svetlobe, kot so bela svetloba, kratkovalovna modra svetloba in druge. Oblika projicirane strukture je lahko točkovna (kot je laserska pika), linearna (kot je laserska črta) ali ravninska (kot so trak, barvni vzorec, stohastični vzorec itd.). Načelo merjenja triangulacije se uporablja tako za laserske kot za optične (ang. *strip light*) bralnike svetlobe.

3.6.1 Strukturirana svetloba

Tehnike strukturirane svetlobe se usmerjajo na projiciranje vzorcev svetlobe na predmet, ki ga želimo zajeti. To ustvari linijo osvetlitve na trirazsežni površini, ki se z drugih zornih kotov zdi popačena in se lahko uporabi za rekonstrukcijo geometrije površine (svetlobni odsek). Kamera zazna obliko vzorca in izračuna razdaljo do vira svetlobe vsake točke v vidnem polju.

Bolj vsestranska in hitrejša metoda je projiciranje vzorcev, sestavljenih iz več črt (Slika 18), saj to omogoča zajem več vzorcev hkrati. Pri tej metodi se zdi vzorec geometrično popačen, ko ga gledamo z različnih zornih kotov, zaradi oblike površine predmeta. Zamik črt omogoča natančen prikaz in zajem 3D-koordinat vseh podrobnosti na površini predmeta.



Slika 18: Primer zajemanja površine s strukturirano svetlobo (lastni vir).

3.6.2 Laserska projekcija

Laserji se uporabljajo kot vir svetlobe v laserskih bralnikih, kjer se zajame laserska linija ali en točkovni laserski žarek na predmetu, ki ga želimo zajeti, da dobimo zaporedje slik in rekonstruiramo 3D-površino. Za doseg natančnega prikaza linij je ključno, da je jakost laserske svetlobe, ki jo uporabljamo, dovolj nizka, da ne povzroča škode na modelu, vendar mora biti obenem dovolj močna, da jo zazna kamera bralnika. Kamera bralnika je opremljena s posebnim senzorjem, ki je občutljiv za lasersko svetlobo. Ta senzor omogoča določitev razdalje med predmeti in izvedbo postopka triangulacije. Uporaba laserskih bralnikov omogoča izjemno natančno zajemanje podatkov na ravni tisočink milimetra.

3.7 Intraoralni optični bralniki

Intraoralni optični bralnik (ang. *Intraoral Scanner* – IOS) je naprava, ki se v zobozdravstvu uporablja za pridobivanje digitalnih 3D-slik pacientovih zob in drugih struktur ustne votline. Gre za ročno napravo v obliki posebnega držala, ki ima na konici majhno kamero. Optični bralnik uporablja svetlobno projekcijo in napredno slikovno tehnologijo za zajemanje slik zob in dlesni z različnih zornih kotov ter pridobivanje digitalnega 3D-modela pacientovih ust.

IOS se vstavi v pacientova usta, nato pa ga zobozdravnik sistematično premika po ustih, da zajame slike vsakega posameznega zoba in okoliškega tkiva. Slike se nato prenesejo v računalnik, kjer programska oprema posamezne slike združi v podroben 3D-model pacientovih zob in dlesni.

Intraoralni optični bralniki se pri kliničnem delu uporabljajo vse pogosteje zaradi natančnosti, učinkovitosti in ker je postopek zajema podatkov za pacienta prijaznejši. Uporaba teh naprav odpravlja tradicionalno odtiskovanje, ki je za paciente lahko neprijetno. Poleg tega intraoralni optični bralniki omogočajo hitrejšo izdelavo zobnih nadomestkov, saj je mogoče digitalne slike poslati neposredno v zobni laboratorij po spletni povezavi.

Naprave IOS se razlikujejo glede na uporabnost in kombinacijo z drugimi komponentami sistema CAD/CAM. Nekatere so samostojne naprave, medtem ko so druge del kompletnega sistema CAD/CAM.

3.7.1 Kompletni sistemi CAD/CAM

Kompletni sistemi CAD/CAM združujejo napravo za intraoralno zajemanje podatkov, programsko opremo za oblikovanje in rezkalno enoto za izdelavo zobnih nadomestkov. Z njimi lahko zobozdravstvene ordinacije izvedejo celoten postopek izdelave zobnih nadomestkov, vključno z optičnim zajemom podatkov, oblikovanjem in rezkanjem končnih oblik zobnih nadomestkov. To ordinaciji omogoča, da pacientom zagotovi celotno oskrbo še isti dan, brez potrebe po začasnih restavracijah ali nadaljnjih terminih za vstavitve. V sodobni zobozdravstveni praksi se vse bolj uporabljajo kompletni sistemi CAD/CAM z vključenimi intraoralnimi optičnimi bralniki (Slika 19), kot so CEREC AC Bluecam, CEREC Omnicam, Sirona (Nemčija), Planscan in Planmeca (Finska). Te naprave

omogočajo digitalni pregled pacientovega stanja. Terapevt si lahko skupaj s pacientom ogleda slike za lažje razumevanje njegovega stanja in potrebnega zdravljenja. Poleg tega lahko računalniško programsko opremo uporabi za oblikovanje načrta (predloga) zobnega nadomestka in pacientu takoj prikaže mogoče estetske spremembe njegovega nasmeha.



Slika 19: Sirona CEREC AC Omnicam z rezkalno enoto MC XL (vir: Interdent).

IOS ima prednost pred tradicionalnimi analognimi odtisi tudi pri brušenju zob. Njegova sposobnost takojšnjega ogleda obrušeni zob pri bistveno večji povečavi omogoča ovrednotenje in ugotavljanje morebitnih težav, ki bi lahko negativno vplivale na izdelavo zobnih nadomestkov, kot so na primer podvisna mesta in ostri koti. Z IOS je mogoče predele, ki jih je treba prilagoditi, takoj popraviti, ponovno zajeti in ponovno ovrednotiti.

Ko zobozdravnik odobri digitalne odtise, lahko računalniška programska oprema določi in označi mejo cervikalne zapore na virtualnem modelu ter načrtuje restavracije, kot so prevleke, inleji, onleji ali luske. Pri tem uporablja orodja za oblikovanje, kot so prilagoditev aproksimalnih stikov, okluzije in morfoloških podrobnosti. Datoteka z oblikovano virtualno restavracijo se nato prenese v rezkalno enoto za izdelavo. Po izdelavi se izdelek lahko dodatno ročno obdela z barvanjem, glaziranjem in sintranjem, nato pa se ga dokončno cementira še v istem dnevu, odvisno od uporabljenega materiala.

3.7.2 Samostojni intraoralni optični bralniki

Samostojni IOS, kot so ITerio Digital Impression System (Align Technology, ZDA), True Definition Scanner (3M ESPE, ZDA), IOS FastScan (IOS Technologies, ZDA) in Trios (3Shape, Danska) (Slika 20), ki so na voljo danes, zobozdravnikom omogočajo delo z vsemi laboratoriji in strokovnimi sodelavci, ne glede na to, ali ti uporabljajo opremo istega proizvajalca ali ne. To poenostavlja komunikacijo, načrtovanje zdravljenja in zagotavlja višjo raven oskrbe pacientov. Samostojni digitalni optični bralniki omogočajo enake funkcije kot kompletni sistemi CAD/CAM (digitalni zajem prvotnega stanja, stanja obrušeni zob, ocenjevanje in načrtovanje zdravljenja ter izdelavo virtualnega modela), zgolj oblikovanje in izdelava restavracij ne potekata v ordinaciji.

Datoteko z digitalnimi odtisi je mogoče neposredno poslati v zobni laboratorij za izdelavo digitalnega modela in nadaljnjo izdelavo dokončne restavracije, zobnega nadomestka ali 3D-tiskanega kirurškega vodila za namestitvev vsadka.



Slika 20: Trios 3 Pod Dental IOS (3Shape)(lastni vir).

Dodatna prednost IOS je tudi možnost digitalnega zajema podatkov o opornikih zobnih vsadkov ali teles, ki služijo kot osnova za izdelavo restavracij, podprtih z vsadki. Digitalne odtise, pridobljene z IOS, lahko uporabimo tudi za pridobivanje digitalnih modelov, ki se uporabljajo pri programiranem ortodontskem zdravljenju s prozornimi opornicami.

Tako kot IOS, ki je sestavni del kompletnih ordinacijskih sistemov CAD/CAM, tudi samostojni IOS zobozdravstvene ordinacije razbremeni zamudnih korakov, povezanih s klasičnimi tehnikami odtiskovanja, vključno z izbiro odtisnih žlic, odmerjanjem in pripravo

materialov, dezinfekcijo in pošiljanjem odtisov v zobni laboratorij. Tudi laboratoriji so z digitalnimi tehnologijami učinkovitejši, saj z uporabo IOS izlivanje odtisov, obrezovanje, žaganje in brušenje modelov ter priprava IDM in vmavčevanje v artikulacijo niso več potrebni. Zobni nadomestki so tako izdelani na podlagi digitalnih podatkov in virtualnih modelov, ne pa mavčnih modelov, nastalih na podlagi analognih, elastomernih odtisov.

3.7.3 Uporabnost digitalnih optičnih bralnikov

Z optičnimi 3D-bralniki lahko pridobimo virtualne modele in digitalne diagnostične navoske, kar zobozdravnikom in zobnim laboratorijem omogoča, da različne protetične izdelke pripravijo tako, da znatno zmanjšajo nelagodje pacientov pri odtiskovanju in jim olajšajo razumevanje njihovega zdravstvenega stanja in predlaganih načrtov zdravljenja. Obenem so optično zajete slike in virtualni modeli izjemno koristna orodja za boljšo diagnostiko in spremljanje stanja pacienta, pa tudi za posvetovanje in sodelovanje z drugimi člani zobozdravstvenega tima.

Izbira barve

Različni fotospektrometri omogočajo digitalno zajemanje barve zob. Sprva so se za izbiro barve zob uporabljale naprave za barvno analizo odtenka, kot so ShadeEye NCC (Shofu, Japonska), ShadeVision (X-Rite, ZDA) in Easy shade (Vita Zahnfabrik, Nemčija), ki so uporabljale digitalno pridobljene podatke. Sodobne tehnologije CAD/CAM pa omogočajo, da se oblika in barvni odtenki zajamejo hkrati z eno samo napravo, kot je na primer Trios (3Shape, Danska).

V primerjavi s človeško interpretacijo barve, ki je zaradi dnevne in umetne svetlobe, barve oblačil in individualnih optičnih zaznav lahko napačna, tehnologija CAD/CAM omogoča natančno in hitro zaznavanje barv. S tehnologijo CAD/CAM se optični bralnik uporablja za samodejno zaznavanje odtenkov sosednjih zob med zajemanjem slik brušenih zob. Barvni odtenki se nato prikažejo v datotekah z digitalnimi odtisi ali datotekah za oblikovanje restavracij, kar odpravlja morebitno barvno neskladnost končne restavracije.

Diagnostika

Intraoralni digitalni posnetki v kombinaciji z računalniško tomografijo s stožčastimi žarki (CBCT) zobozdravnikom omogočajo lažjo in boljše diagnosticiranje patologije v ustni votlini in sosednjih strukturah. S temi digitalnimi datotekami lahko pacientovo stanje ocenijo objektivneje in celoviteje. Danes so na voljo številne naprave CBCT, kot so ICAT, Imaging Sciences International (Dexis, ZDA), Galileos (Sirona, Nemčija), GXDP-700 (Gendex, ZDA) in ProMax (Planmeca, Finska). Kombinacija naprave CBCT in bralnika IOS lahko pomaga pri načrtovanju oskrbe z zobnimi vsadki in ortodontskega zdravljenja ter pri maksilofacialnih kirurških posegih.

Registracija medčeljustnega odnosa

Zaradi izboljšav intraoralnih optičnih bralnikov je danes mogoče natančno zajeti medčeljustne odnose. Z intraoralnim skeniranjem lahko zajamemo odnos med zgornjo in spodnjo čeljustnico oz. zobnim lokom, kar lahko uporabimo za oblikovanje okluzijskih površin in oceno obrabe zob.

3.8 Laboratorijski optični bralniki

Laboratorijski optični bralniki so v uporabi že več kot 20 let, saj lahko optično zajemajo različne vrste mavčnih modelov in analognih odtisov. Prednost laboratorijskega zajemanja podatkov je odsotnost intraoralnih danosti, kot so slina, kri in mehka tkiva, ki lahko vplivajo na zaplete pri intraoralnem zajemanju. Poleg tega so delovni modeli, ki so nameščeni v artikulator, uporabni za številne laboratorijske postopke, zlasti v primerih kompleksne protetične oskrbe.

Optični laboratorijski bralniki so se z razvojem zelo izboljšali; so hitrejši, natančnejši in omogočajo zajemanje večjega števila podatkov, ki so na voljo. Prav tako se nenehno izboljšuje tudi programska oprema, ki se uporablja za zagon teh naprav in za pridobivanje ter obdelavo podatkov. Zaradi izboljšanja programske opreme se je skrajšal čas zajemanja in obdelave podatkov.

Trirazsežno zajemanje podatkov je ključnega pomena za pridobivanje zelo natančne digitalne reprodukcije površinske topografije predmeta. To se doseže s snemanjem

točkovnega oblaka v sistemu treh prostorskih koordinat (x , y in z). Natančnost digitalne reprodukcije zajete površine je odvisna od števila in točnosti izmerjenih točk v 3D-prostoru. Več dejavnikov, kot so prosojnost predmeta ali njegove zrcalne površine (pri optičnem branju), strojna oprema bralnika glede na njegovo os ali velikost njegove otipne sonde ter programska oprema za izračun, vpliva na zajemanje in natančnost zajetih podatkov. Poleg teh dejavnikov je tudi čas, potreben za eno zajemanje delovnega modela z več IDM, ekonomsko zelo pomemben dejavnik.

Lasersko zajemanje in projekcija svetlobe z optičnimi črtami (Slika 21) sta optični merilni tehnologiji, ki se uporabljata za 3D-digitalizacijo površine delovnega modela ali odtisa. Obe metodi temeljita na triangulaciji, pri čemer se svetlobne strukture (običajno trakovi) projicirajo na objekt, nato pa jih zajamejo svetlobni senzorji. Z nastavitvijo znane geometrije med kalibracijo je mogoče iz pridobljenih slikovnih podatkov izračunati 3D-podatke.



Slika 21: Projekcija svetlobe z optičnimi črtami v laboratorijskem optičnem bralniku (lastni vir).

Medtem ko je prej veljalo, da laserski optični bralniki zagotavljajo višjo ločljivost in natančnost, obe metodi danes zagotavljata natančnost $10\ \mu\text{m}$ ali manj. Obseg uporabe laboratorijskih optičnih bralnikov sega od zajemanja posameznih IDM do zajemanja segmentov loka, modelov celotnega loka, odtisov, registracije med čeljustnega odnosa in skeniranja navoska. Za izboljšanje natančnosti zajemanja nekateri optični bralniki zahtevajo uporabo prahu, ki ne odseva, medtem ko drugi zahtevajo uporabo modelov iz posebnega mavca za optično zajemanje. Novejši optični bralniki vsebujejo kamere visoke ločljivosti, ki omogočajo prilagodljivo zajemanje odtisov, pa tudi zmožnost zajemanja teksture in barve površin.

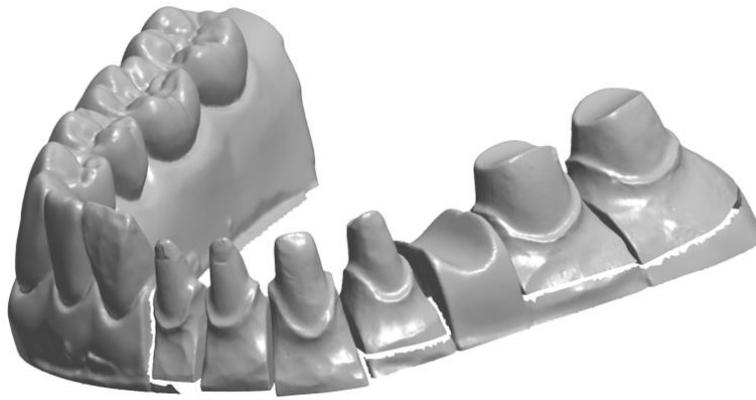
Optični bralniki imajo običajno najmanj dve kameri ali dva laserska senzorja. Obenem so modeli običajno pritrjeni na večosni rotacijski mehanizem, ki omogoča vrtenje in nagibanje predmeta med postopkom zajemanja. S tem se napravam za zajemanje omogoča učinkovito zaznavanje predmeta s katerega koli (zornega) kota, kar zagotavlja zajem vseh podrobnosti predmeta, vključno s podvisnimi mesti. Z večjim poljem zajemanja in izboljšano natančnostjo zajetih podatkov se izboljša tudi splošna kakovost zajema. Sodobni laboratorijski bralniki lahko hkrati zajamejo dva modela in ne zahtevajo dodatnega postopka zajemanja za pridobitev pripravljenih IDM, če je optični dostop projicirane svetlobe do predmeta optimalen.

3.9 Programska oprema in potek pridobivanja podatkov

Programska oprema skrbi za digitalni potek pridobivanja in sestavljanja zajetih podatkov ter naknadne obdelave teh podatkov. Pri tem sta kakovost slike in hitrost računalnika dejavnika, ki omejujeta velikost in podrobnosti pridobljenih digitalnih modelov.

3.9.1 Pridobivanje in sestavljanje zajetih podatkov

Razvoj točkovnih oblakov, ki jih proizvajajo optični 3D-bralniki in njihova vgrajena programska oprema, predstavlja digitalno pretvorbo analogne geometrijske površine v virtualni model. Analogni podatki površine se s pretvorbo slike spremenijo v digitalne podatke. Točkovni oblaki so shranjeni v eni ali več datotekah, običajno v lastniških (zaprtih) formatih, pripravljenih za naslednjo fazo obdelave podatkov, ki zagotavlja odprto datoteko, ki jo je mogoče uvoziti v programsko opremo za načrtovanje. V tej fazi programska oprema izvede čiščenje in filtriranje točk zajema, ki bi lahko vseboval nenavadne in presežne gostote točk zaradi večkratnega prekrivanja pri zajemu. Nato programski algoritmi očistijo in poravnajo točke, zajete na fizični površini. To je kritična faza, ki lahko povzroči odstopanja od dejanskega stanja zob in mehkih tkiv. Razvoj točkovnega oblaka je mogoče sestaviti z več zajemanji pri različnih ločljivostih. Tako je mogoče ponovno zajeti in izmenjati posamezne podatkovne datoteke, kot so IDM z visoko ločljivostjo ali sosednji zobje z manj koncentriranimi točkami. Napredni sistemi omogočajo tudi izrez območij točkovnega oblaka ter ponovno zajemanje in vstavljanje novih podatkov (Slika 22).



Slika 22: Virtualni model s podrobno zajetimi IDM (lastni vir).

Ta postopek izdelava eno samo datoteko, ki vsebuje seznam posameznih točkovnih oblakov in njihovih koordinat za medsebojno povezavo. V napravah za optično branje, ki imajo izhodno datoteko v odprtem formatu, je mogoče podatke prenesti in analizirati z nadaljnjo obdelavo in oblikovanjem, ki uporabljata nešifrirane podatke. Te podatke je mogoče neposredno uporabiti za meritve in grafični prikaz v postopkih načrtovanja (CAD) ter pozneje pri izdelavi (CAM).

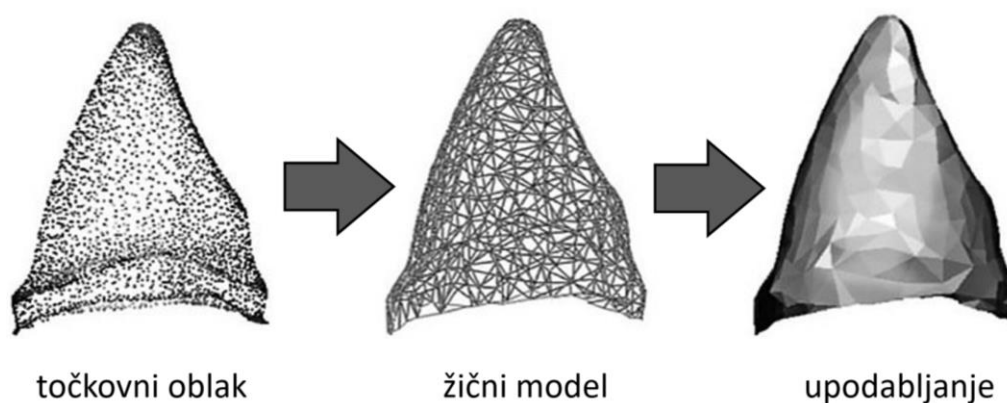
Pri zajemanju podatkov in kasneje pri načrtovanju operater na zaslonu ne vidi posameznih točkovnih oblakov, temveč zaprto in povezano površino med njimi. Merilne napake, kot so prazni predeli, ki nastanejo zaradi manjkajočih točk, se lahko odpravijo z izračunom programske opreme. Tako se nastale napake pri zajemanju z vnaprej določene stopnje tolerance samodejno zapolnijo in so zato uporabniku nevidne. Enak pojav je prisoten na ostrih robovih in prehodih med površinami. Za reprodukcijo finih površinskih značilnosti predmeta sta potrebna zelo natančna porazdelitev točk in prilagojen algoritem za aplikacijo v fazi obdelave točkovnega oblaka. Natančnost zajemanja in razvitega točkovnega oblaka je zato odvisna od strojne opreme v kombinaciji s sistemsko in posebno programsko opremo.

3.9.2 Naknadna obdelava zajetih podatkov v CAD

Digitalno zajete podatke je treba najprej obdelati s programsko opremo za zajemanje podatkov, nato pa jih prenesti v programsko opremo CAD. Pred fazo načrtovanja je treba izvesti naknadno obdelavo digitalnih geometrijskih podatkov, da se doseže virtualna predstavitev s povezanimi geometrijskimi podatki. To zagotavlja, da se zajeti podatki

grafično prikažejo kot celoten objekt s površino za začetek postopka načrtovanja v programski opremi CAD.

Pri obdelavi podatkov s programsko opremo se uporablja postopek točkovnega zamreževanja, ki temelji na triangulaciji in omogoča avtomatsko pridobivanje poligonalnega trirazsežnega modela, npr. žičnatega modela. Sledi upodabljanje (Slika 23), kjer model predstavlja ukrivljeno obliko z veliko majhnimi, ravnimi ploskvami, ki so povezane sosednje točke z ravnimi črtami in tvorijo neprekinjeno površino. Ta površinski model se lahko uporablja za načrtovanje zobnega nadomestka in je bil prvotno razvit za izdelavo objektov s stereolitografijo. Standardni format datoteke za take modele se imenuje tudi standardni teselacijski jezik (ang. *Standard Tessellation Language* – STL).



Slika 23: Obdelava zajetih podatkov od točkovnega oblaka do upodabljanja površine (lastni vir).

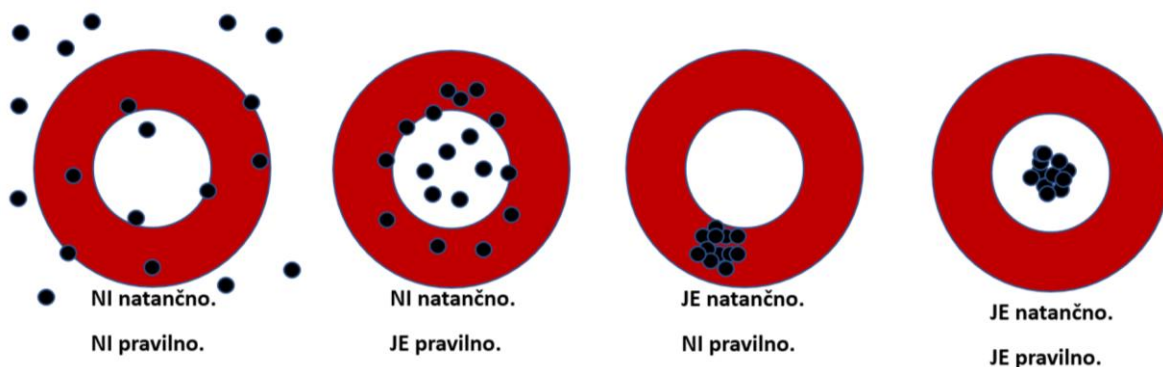
Na upodobljeni površini je mogoče preveriti mejo preparacije obrušeni zob ter jo označiti kot osnovni okvir za načrtovanje in oblikovanje končne restavracije. Pri prenosu teh podatkov v naslednji korak digitalnega poteka dela je potreben referenčni in umerjeni digitalni vmesnik, ki skrbi za prikaz vseh pomembnih podrobnosti in uporabniku omogoča preprosto delo. S tega vidika je zaprta (lastniška) oblika podatkov enega samega ponudnika vseh komponent strojne in programske opreme kompletnega sistema CAD/CAM v primerjavi z odprtim sistemom CAD/CAM, ki vključuje več proizvajalcev, prijaznejša za vzdrževanje. Tudi če je uporabljen lastniški format datoteke, so mreže točk v točkovnih oblakih in njihove koordinate predstavljene kot sezname v datoteki. Prednost zaprtega sistema CAD/CAM je, da je en sam ponudnik odgovoren za celotno digitalno rešitev in pogosto ponuja podporo na vsakem koraku digitalnega poteka dela. V odprtih sistemih

CAD/CAM podatke obdelujejo različna programska oprema in stroji različnih proizvajalcev. To lahko povzroči težave pri prepoznavanju vzroka za morebitne napake, težave z združljivostjo pa lahko vplivajo na natančnost končnega izdelka. Zobozdravniki in laboratorijski izvajalci se pogosto zanašajo na zanesljivost zaprtih sistemov, namesto na odprte sisteme CAD/CAM, pri katerih se lahko pojavijo težave pri pretvorbi podatkov iz enega datotečnega formata v drugega.

Pri zobozdravstveni uporabi je velikost nabora podatkov, ki se izvozijo v program CAD, pomemben dejavnik. Izvožene površinske datoteke ni mogoče urejati, vendar nekatere programske opreme dovoljujejo obrezovanje in dodatno oblikovanje površine, kar omogoča prilagajanje velikosti zajetih podatkov.

3.10 Točnost optičnih bralnikov

Optični bralniki se lahko razlikujejo glede na točnost, zato je pomembno, da se uporabljajo standardizirani postopki za primerjavo in vrednotenje naprav. Standard ISO 12836:2015 opisuje te postopke za laboratorijske optične 3D-bralnike in proizvajalci morajo zagotavljati, da so vsi njihovi izdelki skladni s tem standardom. Za opredelitev točnosti optičnega bralnika se uporabljata dva parametra: pravilnost in natančnost (Slika 24), ki ju opredeljuje standard DIN ISO 5725. Natančnost se nanaša na ponovljivost rezultatov v skupini, pravilnost pa na primerjavo dejanskega stanja z referenčnim zajemanjem podatkov. Najbolje je, da ima optični bralnik čim boljši obe vrednosti, kar pomeni, da so zajeti podatki enaki ali čim bolj podobni dejanskemu objektu.



Slika 24: Shematična ponazoritev »natančnosti in pravilnosti« (lastni vir).

Oba vidika lahko vplivata na točnost zajemanja podatkov in ovira ju lahko več dejavnikov. Pri tehnologiji zajemanja podatkov je ključna pravilnost originalnega obrušenega zoba oz. površine, ki jo zajemamo. Pri uporabi svetlobne projekcije z optičnimi trakovi pa je pomembno odpraviti odboj svetlobe od površine in preprečiti vdor svetlobe v površino. Za doseg tega mora biti predmet, ki ga želimo optično prebrati, izdelan iz materiala, ki ne odseva, ali pa je treba njegovo površino predhodno pripraviti s posebnim prahom za optično zajemanje. V prvem primeru je postopek ugodnejši, ker lahko prašenje površine povzroči določena odstopanja, ki vodijo v netočnost pri meritvah. Poleg tega so vsi rezultati, ki temeljijo na odtisu in spremljajočem mavčnem modelu, vzrok za netočnosti, ki so značilne za klasični potek dela v protetiki.

Poleg stanja površine vzorca in uporabljene tehnologije je za kakovostno matematično triangulacijo pomembno tudi, kako trikotniki opisujejo površino, še posebej ostre stranice in prehode med površinami. Za doseganje natančnih rezultatov je treba uporabiti visoko ločljivost meritev, kar pa lahko ustvari velike datoteke (Slika 25) in zahteva računalniško strojno opremo z visoko grafično zmogljivostjo. Velikost podatkov mora biti primerna glede na uporabljeno programsko opremo, zmogljivost računalnika in želeno natančnost, za praktično in ekonomično uporabo v nadaljnjih postopkih CAD.



Slika 25: Primerjava velikost podatkov neobrezanega (polnega) in obrezanega virtualnega modela (lastni vir).

3.11 Formati datotek pridobljenih podatkov

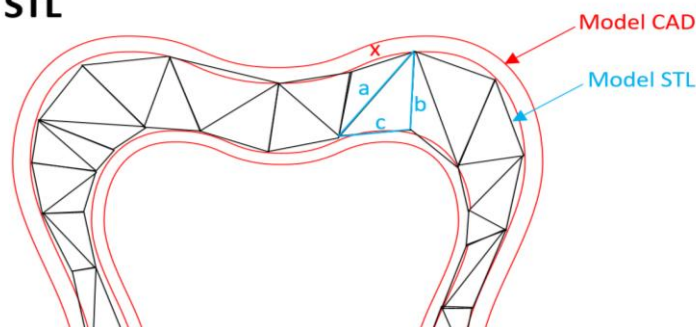
Za digitalno oblikovanje potrebujemo virtualni model, zato je nujno ustvariti datoteko, ki predstavlja površinsko geometrijo trirazsežnega objekta. Pri tem je treba izbrati ustrezno računalniško končnico datoteke, saj obstaja veliko različnih formatov za digitalne 3D-objekte (Slika 26), kot so .ply, .obj in .dcm. Med vsemi je najbolj razširjena datoteka STL.



Slika 26: Različne vrste datotek za prikaz 3D-objekta (lastni vir).

Podjetje 3D Systems® Company je datoteko STL ustvarilo za uporabo v opremi CAD za stereolitografijo, da bi izboljšalo podatkovni postopek za 3D-tiskanje in računalniško podprto izdelavo. Čeprav se je STL prvotno imenoval po stereolitografiji, se danes uporablja tudi za poimenovanje standardnega teselacijskega jezika (ang. *Standard Tessellation Language*) oz. standardnega trikotniškega jezika (ang. *Standard Triangle Language*), saj uporablja trikotne oblike za predstavitev oblike predmeta (Slika 27). Danes datoteke STL podpirajo številni programi in so postale univerzalni jezik CAD. Nekateri programski sistemi za shranjevanje podatkov pa uporabljajo druge vrste datotek, ki so veljavne le v ustrezni programski opremi, npr. datoteka DCM, ki jo uporablja 3Shape (Danska), ali datoteka PLY, ki jo uporablja Carestream® (ZDA), medtem ko druge datoteke, kot je datoteka OBJ, lahko uporablja več programskih paketov. Te datoteke lahko vsebujejo dodatne podatke, kot je barva (Slika 28), česar v formatu STL ni (Slika 29).

Datoteka STL



Slika 27: Shematičen prikaz razlike med zapisom datoteke CAD in STL (lastni vir).

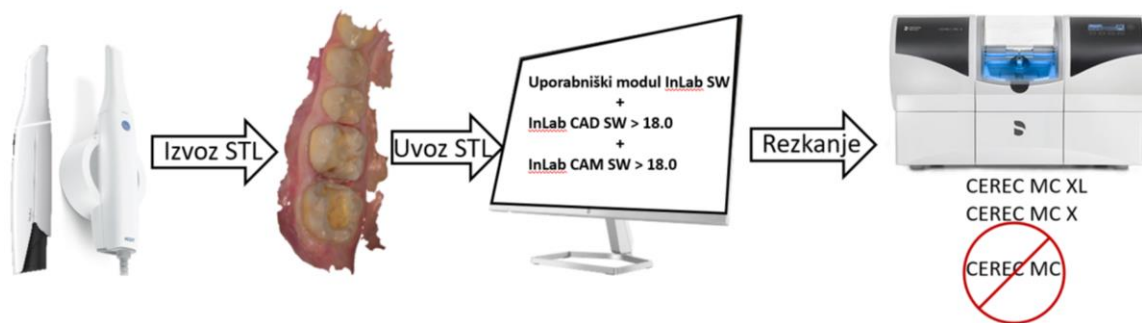


Slika 28: Zajemanje površine v formatu DCM (lastni vir).



Slika 29: Navadna datoteka STL, zgolj s topografijo površine (lastni vir).

Več proizvajalcev uporablja lastne formate zapisov datotek STL. Razlog za to je, da uporaba univerzalnih datotek STL v sistemu CAD/CAM lahko povzroča težave pri pretvarjanju v združljivo obliko datoteke. Lastna oblika zapisa datoteke STL je zelo pogosta v kompletnih ordinacijskih sistemih CAD/CAM, pri katerih je en proizvajalec izdelal digitalni optični bralnik, programsko opremo za oblikovanje in rezkalno enoto. Datotek takih proizvajalcev ni mogoče uporabljati na različnih napravah CAD/CAM, saj so zaprte za druge sisteme (Slika 30).



Slika 30: Shematičen prikaz pretoka datotek skozi sistem CAD/CAM (lastni vir).

Posledično se je veliko zobozdravnikov in laboratorijev odločilo za uporabo ene licenčne programske opreme za računalniško oblikovanje in sistem rezkalnih enot, ki je združljiva z njihovim sistemom za digitalno odtiskovanje. Na srečo je vse več proizvajalcev danes pripravljenih odpreti svoje datoteke STL za uporabo z različnimi napravami CAD/CAM (t. i. odprti sistemi).

3.12 Povzetek

Ker so IOS orodja za natančnejše in učinkovitejše zajemanje ustreznih intraoralnih podatkov o pacientih, pa tudi zato, ker olajšajo oskrbo pacienta, uporaba digitalnega zajemanja podatkov hitro narašča.

Da bi sledili zahtevam po večji funkcionalnosti in združljivosti s preostalo opremo CAD/CAM, proizvajalci sproti uvajajo novejšje optične 3D-bralnike za dentalno uporabo.

Prednosti digitalnega odtiskovanja so številne. Digitalne podatke je mogoče elektronsko hraniti v ordinacijah in laboratorijih, zaradi česar ni več potrebe po fizičnih prostorih za shranjevanje mavčnih modelov. Za paciente je digitalno odtiskovanje prijaznejše in jim v primerjavi z analognimi tehnikami omogoča boljše razumevanje njihovega stanja ter ciljev zdravljenja. Ordinacije pa ne potrebujejo več običajnih odtisnih materialov.

Laboratorijski bralniki so na voljo v široki paleti strojne in programske opreme, ki ju ponudnik večinoma vključi v določen poslovni model. Odločitev za določeno opremo mora temeljiti na individualnih potrebah na določenem področju protetike. S povečano zmogljivostjo (resolucijo) optičnega bralnika se podaljšuje tudi čas, potreben za zajemanje in izračun večje količine podatkov, kar lahko predstavlja težavo. Prilagodljiva programska oprema za zajemanje mora omogočati prilagoditev pri individualni uporabi za različne indikacije. Nekateri bralniki so že nastavljeni z možnostjo preprostega povezovanja dodatnih podatkov, kot so uporaba digitalnega individualnega 3D-artikulatorja, 3D-zajem obraza in drugi diagnostični 3D-podatki.

Vprašanja:

- S katerim postopkom se v zobozdravstvu pridobijo in prenesejo anatomske podatke z namenom izdelave posrednih protetičnih izdelkov?
- Katere so prednosti digitalnega odtiskovanja?
- Kakšen je v zobozdravstvu namen odtiskovanja oz. zajemanja podatkov?
- Razloži posredno in neposredno pridobivanje podatkov.
- Opiši razliko med stično in nestično metodo.
- Kaj je triangulacija?
- Kaj je IOS?
- Za kaj vse se lahko uporablja oprema za zajemanje podatkov?
- Kako je opredeljena točnost digitalnih optičnih bralnikov?
- Kakšno natančnost v mikronih zagotavljajo današnji optični bralniki v zobozdravstvu?
- Kaj je STL in katere podatke zajema?
- Kaj pomeni pojem zaprtih oz. lastniških datotek?

4 RAČUNALNIŠKO PODPRTO OBLIKOVANJE

UČNI CILJI

Ob koncu tega poglavja mora bralec:

- razumeti zmožnosti in omejitve CAD sistemov za načrtovanje restavracij;
- znati razložiti tipičen postopek digitalnega oblikovanja restavracij;
- opisati lastnosti digitalno oblikovanih restavracij.

Pri zagotavljanju optimalne protetične oskrbe je ključni dejavnik načrtovanje. Restavracijo lahko oblikujemo s klasičnim postopkom voščene modelacije ali pa uporabimo digitalne tehnike oblikovanja. Temeljna načela za izdelavo biološko, mehansko in estetsko optimalnega zobnega nadomestka pa ostajajo enaka, ne glede na uporabljeni postopek.

Pri oblikovanju zobnih nadomestkov je ključno upoštevati številne značilnosti zob, zato je nujno dobro poznavanje zobne morfologije in gnatologije. Pri oblikovanju zobnih nadomestkov sta prva koraka prepoznavanje in opredelitev meje preparacije ter smeri vstavitve, pomembno je tudi oblikovanje notranjosti restavracije. Poleg tega je treba razumeti, kako in pod kakšnim kotom naj bodo stične točke in embrasure postavljene, pri oblikovanju zobnih nadomestkov pa je treba upoštevati tudi vse preostale gnatološke značilnosti.

Pri protetični oskrbi prizadetega zobovja je cilj, da pacientu povrnemo normalno funkcijo in estetski videz. Optimalna kopija naravnih zob je najvišje doseženo merilo v sodobni estetski zobozdravstveni praksi. Za uspešno protetično oskrbo je ključno razumevanje odnosa med obliko in funkcijo zob ter medsebojno povezanost obeh lastnosti pri zagotavljanju naravnega videza zob in ustrezne funkcije stomatognatnega sistema.

Računalniško podprto oblikovanje (CAD) se vse bolj uveljavlja v zobozdravstvu, saj omogoča izjemno natančno in obenem estetsko oblikovanje zobnih nadomestkov. Vendar pa tehnologija sama po sebi ni dovolj za zagotavljanje optimalne protetične oskrbe. Le poglobljeno razumevanje načel stroke omogoča celosten pristop k oskrbi pacienta. Digitalni delovni postopki in tehnologija lahko olajšajo delo zobozdravnikov in laboratorijskih izvajalcev ter povečajo učinkovitost in natančnost obnovitvenih postopkov, ne morejo pa

nadomestiti strokovnega znanja, izkušenj in presoje strokovnjaka, ki je ključen pri doseganju optimalnih rezultatov.

4.1 Digitalno oblikovanje zobnih nadomestkov

Tehnologija CAD/CAM je spremenila postopke izmenjave kliničnih in laboratorijskih podatkov. Digitalni odtisi, pridobljeni z IOS, zobozdravnikom in laboratorijskim izvajalcem omogočajo analiziranje in določanje meje preparacij, položaja in morfologije zob ter dodatno oblikovanje zobnih nadomestkov, ki jih za določen primer vnaprej predlaga programska oprema.

Programska oprema CAD večinoma vsebuje podatkovno bazo o velikosti in morfologiji zob, kar omogoča izbiro, postavitev in prilagoditev predlaganih zobnih nadomestkov.

Zaradi avtomatizacije oblikovanja zobnih nadomestkov je delo zobozdravnikov in laboratorijskih izvajalcev olajšano, vendar pa še vedno ni mogoče izdelati nadomestka brez kliničnega in laboratorijskega znanja in izkušenj. Tehnologija CAD lahko pomaga pri analizi meje preparacij, položaja in morfologije zob ter pri načrtovanju zobnih nadomestkov, vendar je ključno, da zobozdravnik ali laboratorijski izvajalec uporabi svoje znanje in presojo pri digitalnem oblikovanju z izbrano okluzijsko anatomijo ter drugimi morfološki in gnatološkimi značilnostmi. Tudi če ima programska oprema CAD vgrajeno bazo podatkov o velikosti zob in njihovi morfologiji, mora zobozdravnik ali laboratorijski izvajalec optimalno obliko zobnega nadomestka še vedno pogosto zasnovati s prilagajanjem oblike, natančno določenim položajem incizalnega robu ali vrška zoba in ujemanjem površinske teksture s sosednjimi zobmi. Z uporabo navideznih orodij, ki ponazarjajo klasične nožke in sonde, je mogoče takoj videti spremembe na virtualnih zobeh oz. konstrukcijah in po želji vnašati zahtevane spremembe.

S sodobno programsko opremo CAD se je ročni postopek modeliranja v vosku preoblikoval v digitalno modeliranje, kar omogoča natančno in hitro izdelavo restavracij. Poleg tega postopki CAD v primeru predhodne registracije medčeljustnega odnosa vključujejo virtualno artikulacijo, kar še dodatno izboljša natančnost in funkcionalnost izdelka.

V delovnem postopku programska oprema CAD poda predlogo in najprimernejši položaj restavracije, nato pa operater uporabi svoje izkušnje in znanje morfologije ter gnatologije za

digitalno modeliranje in artikuliranje restavracije. Odvisno od uporabljene programske opreme lahko okluzijo in artikulacijo predhodno oblikovane začasne oskrbe pacienta natančno podvojimo in v digitalni obliki prenesemo na virtualni delovni model za oblikovanje končne oskrbe.

Pri načrtovanju okluzijskih stikov s postopki CAD je natančnost odvisna od različnih dejavnikov, ki jih je treba upoštevati. Eden ključnih je sposobnost programske opreme CAD, da pravilno poravna digitalno zajete 3D-slike za zagotavljanje natančnosti virtualne okluzije. Raziskave so pokazale, da se statična okluzija lahko reproducira z mikrometrsko natančnostjo.

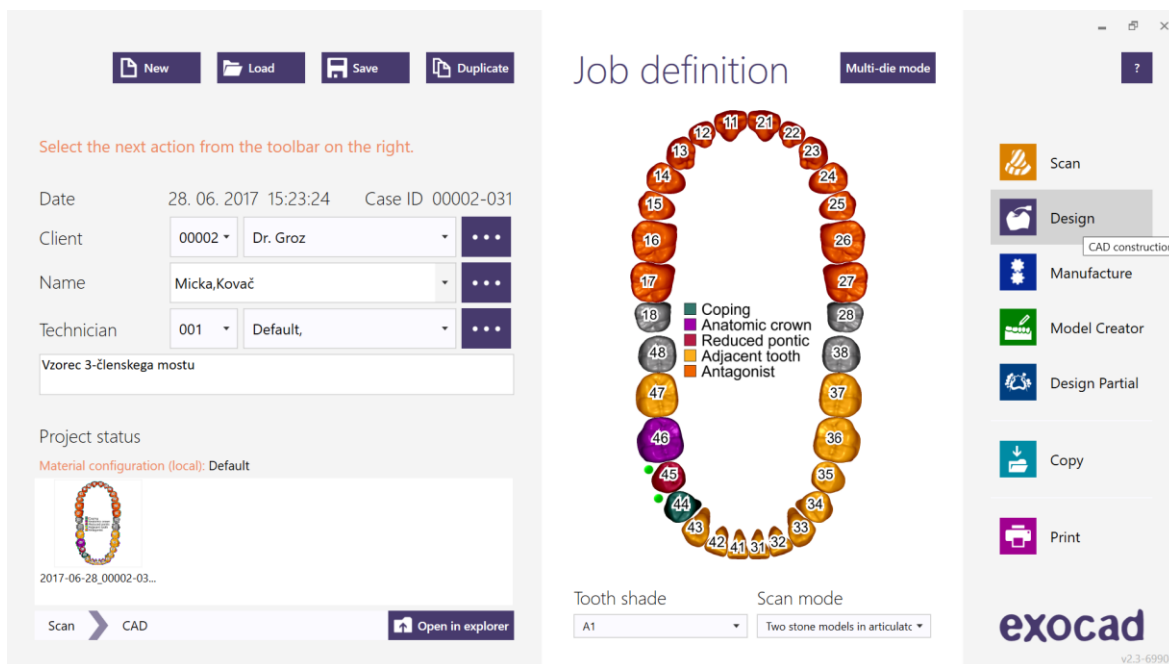
4.2 Digitalno načrtovanje protetične oskrbe

Računalniška tehnologija predstavlja bistveni del digitalne tehnologije CAD/CAM, v kateri ima uporabnik pomembno vlogo pri oblikovanju zobnega nadomestka. Čeprav je vpliv uporabnika na zajemanje podatkov in strojno obdelavo protetične oskrbe razmeroma majhen, je pri načrtovanju protetične oskrbe ključen. Proizvajalci programske opreme se zato trudijo razviti intuitivne in interaktivne programe za načrtovanje, ki uporabniku pomagajo pri načrtovanju. Vsaka programska oprema CAD in njeni moduli imajo svoj posebni program protetičnega načrtovanja, zato naštevamo zgolj osnovne korake določene programske opreme pri oblikovanju mostovne konstrukcije za kovinsko-porcelansko tehniko.

4.2.1 Izpolnjevanje delovnega naloga

Prvi korak je izpolnjevanje delovnega naloga z vnosom pacientovih identifikacijskih podatkov in ustreznih podatkov, povezanih s protetično oskrbo. Ti podatki vključujejo lokacijo obrušeni zob in členov, vrsto materiala, navedbo barve in druge podrobnosti o delu. S tem se pridobi elektronska datoteka pacienta, ki vsebuje predhodno zajete podatke obrušeni zob in zob preostalega dela zobnega loka.

Ko je delovni nalog (Slika 31) shranjen ali naložen v programsko opremo, so na voljo različne možnosti v meniju, kot so tisk dokumenta, zajem podatkov ali oblikovanje, odvisno od specifičnih funkcij, ki jih ponuja proizvajalec določene programske opreme.



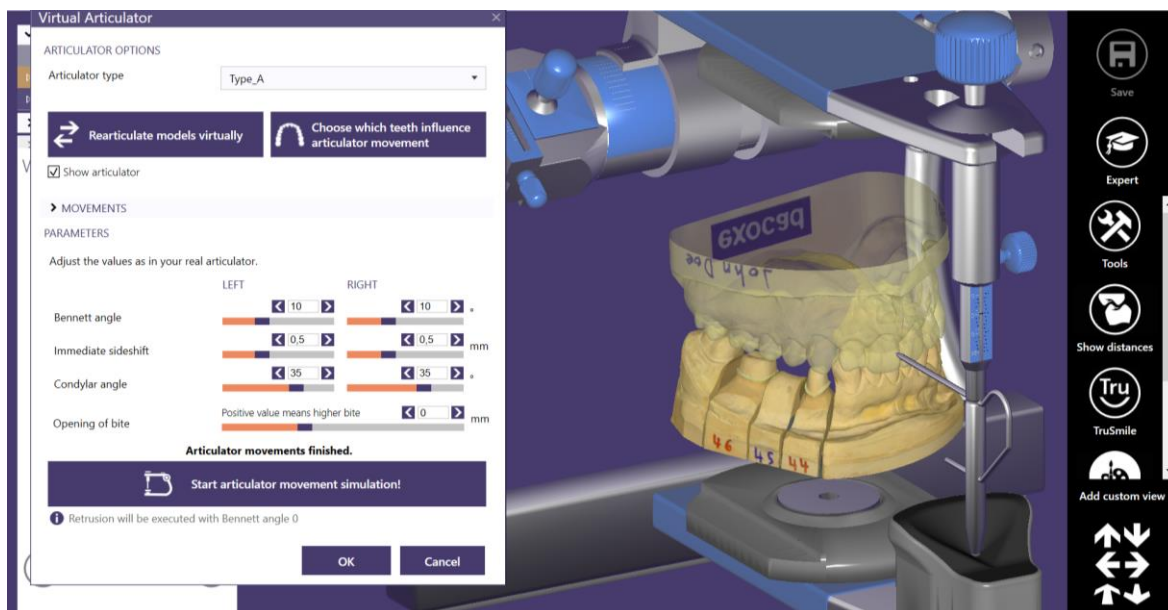
Slika 31: Delovni nalog v programski opremi CAD (lastni vir).

4.2.2 Simulacija okluzije in artikulacije

Mavčne modele je mogoče digitalno zajeti posamično, nato pa jih vmavčiti v analogni artikulator in ponovno digitalno zajeti podatke. Ta postopek programski opremi CAD omogoča, da ločene modele optimalno poravnava na podlagi digitalno zajete okluzije.

Dodatni modul osnovne programske opreme CAD vključuje tudi virtualni artikulator, ki uporabniku prikaže okno z orodji za virtualno artikulacijo (Slika 32). V tem oknu je na voljo več različnih modelov artikulatorjev, ki jih je mogoče prilagoditi glede na uporabnikove potrebe, enako kot pri analognih različicah.

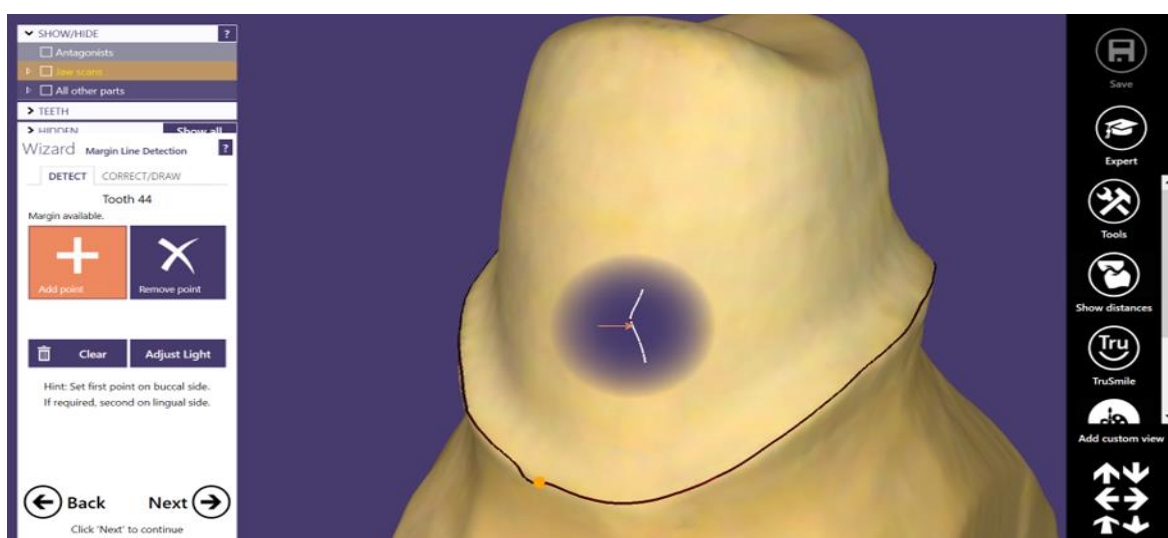
Programska oprema s simulacijo gibov izbranega virtualnega artikulatorja skrbi tako za statično kot dinamično okluzijo med oblikovanjem zobnega nadomestka.



Slika 32: Okno z orodji virtualnega artikulatorja (lastni vir).

4.2.3 Določanje meje preparacije

Začetni korak pri oblikovanju konstrukcije je določanje meje preparacije. Programska oprema v večini primerov zahteva, da operater označi mejo preparacije na določenem obrušenem zobu na zaslonu. To storimo s klikom na točko ali s črto, ki označuje mejo preparacije. Pri prevlekah in preprostejših restavracijah zadostuje en sam klik, saj program mejo preparacije samodejno zazna že po prvem kliku (Slika 33).



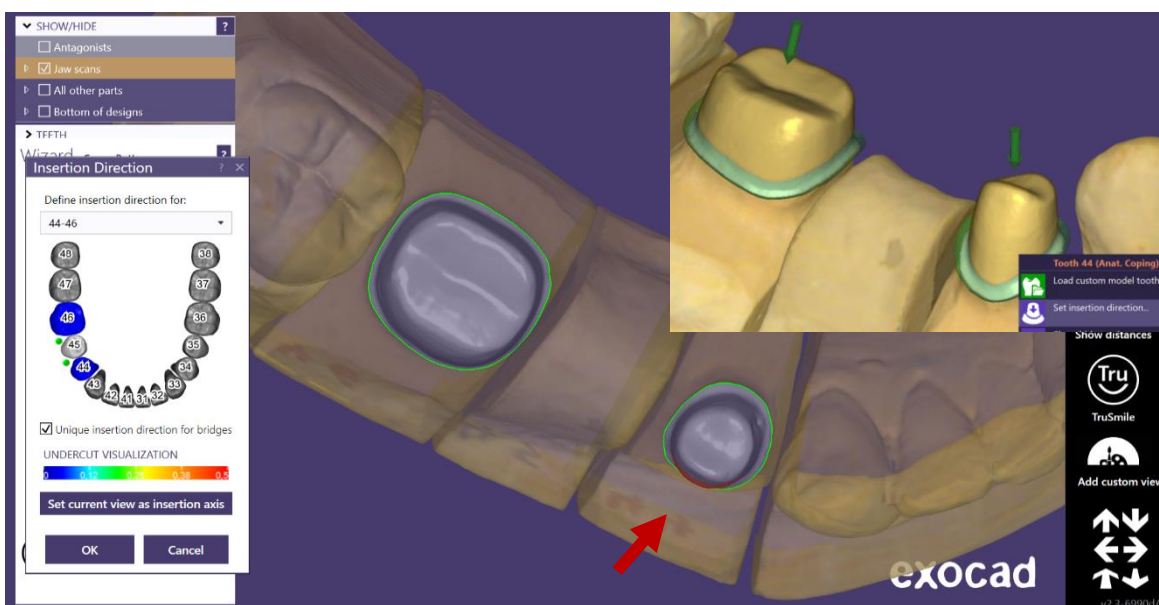
Slika 33: Določanje meje preparacije (lastni vir).

4.2.4 Smer vstavitve

V večini primerov programska oprema samodejno zazna pravilno smer vstavitve zobnega nadomestka. V primerih večje konstrukcije z različno nagnjenimi obrušeni zobmi pa je zaznano smer vstavitve treba preveriti ročno:

- Pri konstruiranju mostov za tri- ali štiriosno rezkanje je v primeru triosnega rezkanja zaradi proizvodnih omejitev pomembno, da imajo vsi zobje v mostičku enako smer vstavitve. Skupna smer vstavitve, ki jo zazna programska oprema, je prikazana uporabniku, ki jo lahko nato še dodatno prilagodi.
- Pri posameznih prevlekah ali elementih mostov pri petosnem rezkanju nas program v zapletenih primerih opozori, da preverimo ali popravimo zaznano smer vstavitve, še posebej pri obrušeni zobeh, kjer je meja preparacije znotraj podvisnega mesta ali kadar obstaja dvom v pravilnosti smeri vstavitve.

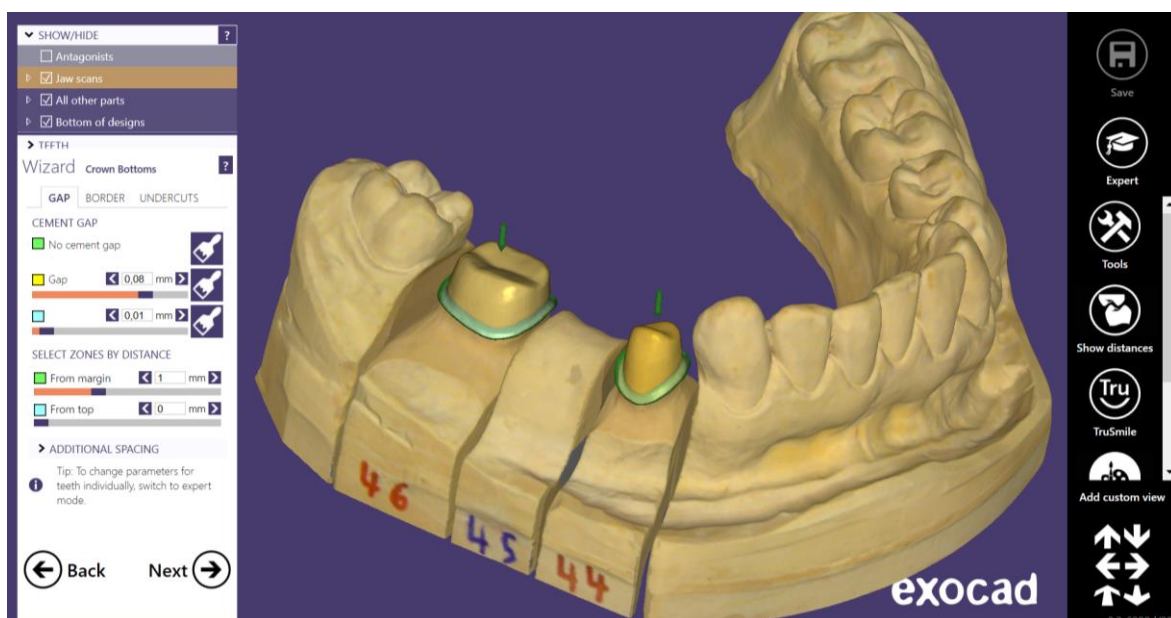
Programska oprema samodejno predlaga smer vstavitve glede na podvisna mesta obrušeni zob. Predlagano smer vstavitve na zaslonu prikaže tako, da prilagodi kot pogleda na preparirane zobe iz smeri vstavitve. Pri tem je globina podvisnih mest označena z barvno lestvico od temno modre (0 mm) do rdeče (0,5 mm) (Slika 34).



Slika 34: Smer vstavitve in barvna lestvica podvisnih mest (lastni vir).

4.2.5 Oblikovanje notranjosti restavracije

Pri tem koraku se posvetimo oblikovanju notranjosti restavracije, ki bo v stiku z obrušenim zobom, kar je ključnega pomena za pravilno prileganje. Če nismo zadovoljni s parametri, ki jih program ponudi, lahko nekatere izmed njih prilagodimo, npr. dimenzijo virtualnega lakiranja IDM za zagotovitev prostora za cemente, oblikovanje robnega dela in nastavitve parametrov rezkanja, ki so povezani s podvisnimi mesti (Slika 35). V programski opremi exocad je eden izmed teh parametrov cementna reža (ang. *cement gap*), ki določa dimenzijo laka IDM. Ta parameter je privzet na višino 1 mm nad mejo preparacije in debelino 0,08 mm. Programska oprema omogoča, da velikost cementne reže prilagajamo v razponu od 0 do 0,2 mm.



Slika 35: Nastavitve parametrov za oblikovanje notranjosti restavracij (lastni vir).

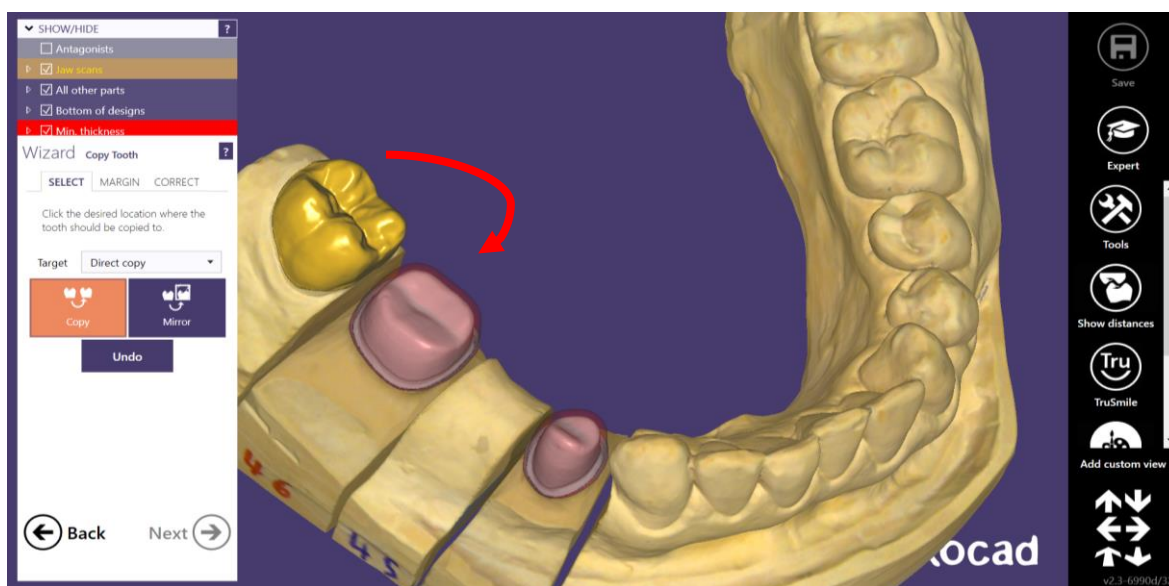
4.2.6 Oblikovanje zunanosti prevleke

Najpogostejša in najpreprostejša tehnika digitalnega oblikovanja zobnih nadomestkov je uporaba natančne kopije obstoječe oblike zoba ali zobnega nadomestka. Ta tehnika uporablja programsko opremo CAD za natančno kopiranje in zrcaljenje oblike obstoječega zoba ali nadomestka, nato pa lahko z njim dodatno oblikujemo nov zobni nadomestek. To je preprosta in predvidljiva tehnika za oblikovanje različnih zobnih nadomestkov. Ta metoda se priporoča, če so velikost, oblika in položaj obstoječih zob ali zobnih nadomestkov

optimalni za obliko želenega zobnega nadomestka. Ta način oblikovanja se uporablja pri izdelavi prevlek, faset in mostičkov.

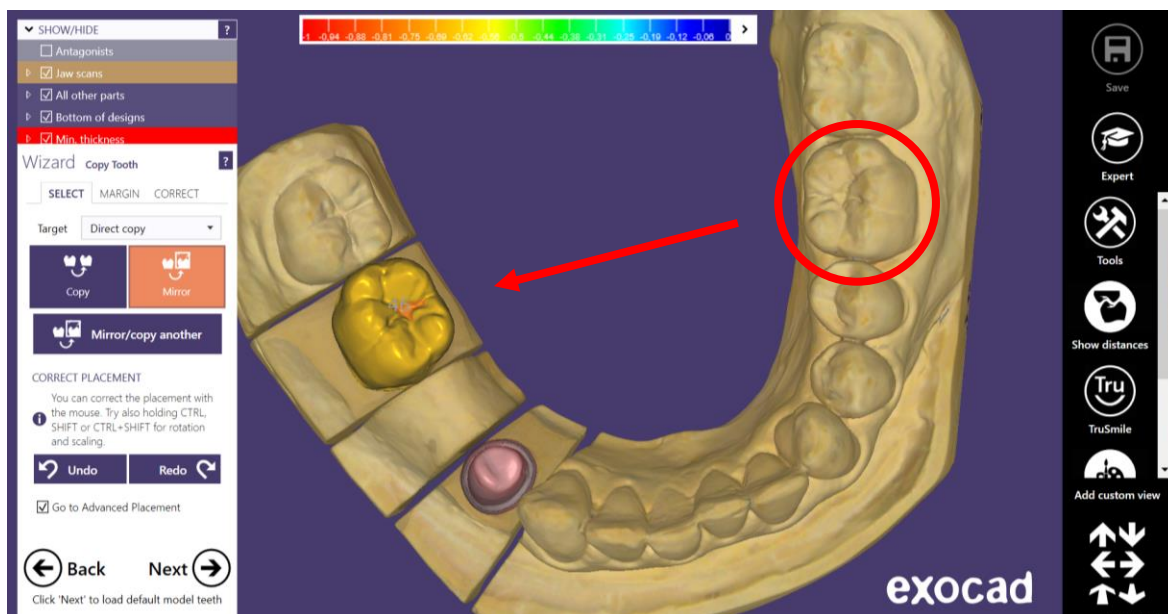
Obstajata dva načina, ki omogočata kopiranje zob iz zajetih podatkov, odvisno od cilja, ki ga želimo doseči. Pri neposredni kopiji se pridobi model zoba kot neposredna kopija obstoječega zoba pred brušenjem. Za oblikovanje zobnega nadomestka se najprej zajame digitalni posnetek zoba, ki ga je treba oskrbeti, skupaj s sosednjimi ali kontralateralnimi zobmi, in se shrani v programsko opremo CAD. Nato se zob zbrusi, zajeti digitalni posnetek obrušenega zoba pa se shrani v programsko opremo CAD. Na zaslonu se nato analizira zajete posnetke, pri čemer se robove preparacije jasno označi z obkroževanjem na virtualnem 3D-modelu. Opredeli se lahko tudi druge vidike, ki so pomembni za oblikovanje želenega zobnega nadomestka, kot je na primer smer vstavitve. Nato se označi zob, ki ga želimo kopirati, in programska oprema CAD pripravi predlog za restavracijo, ki natančno reproducira obliko tega zoba.

Če oblika oskrbovanega zoba ni primerna, lahko funkcijo kopiranja uporabimo tudi za kopiranje preostalih zob znotraj istega kvadranta (Slika 36).



Slika 36: Funkcija kopiranja zob znotraj istega kvadranta (lastni vir).

Kadar kot predlogo za oblikovanje zobnega nadomestka izberemo zobe istega kvadranta, jih preprosto kopiramo s programsko opremo. Če pa za predlogo izberemo kontralateralni zob, uporabimo tudi funkcijo zrcaljenja kopije zoba (Slika 37).



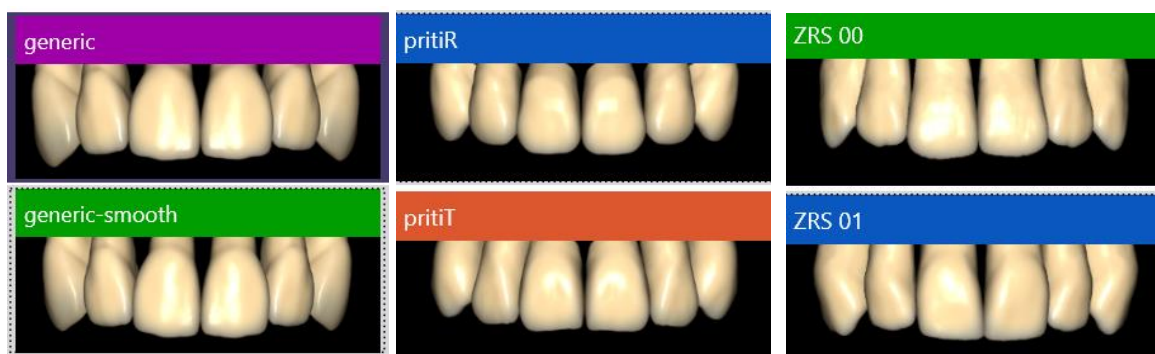
Slika 37: Funkcija zrcaljenja zob (lastni vir).

Če je treba prilagoditi morfologijo kopiranega zoba, lahko to dosežemo z orodji CAD za digitalno modeliranje. Ta orodja lahko uporabimo tudi za spreminjanje in preverjanje stikov med predlaganimi zobnimi nadomestki in sosednjimi zobmi v virtualnem 3D-modelu ter modelacijo celotne površine zobnega nadomestka.

4.2.7 Digitalne knjižnice zobnih oblik

Kadar naravni zobje ali obstoječi zobni nadomestki niso primerni za kopiranje ali zrcaljenje, so digitalne knjižnice zobnih oblik CAD zelo uporabna metoda za digitalno oblikovanje.

Programska oprema CAD analizira sosednje zobe in nadomestke (velikost, obliko, obliko celotnega zobnega loka) in iz knjižnice oblik zob (Slika 38) predlaga obliko restavracije. Ta programska oprema CAD je še posebej uporabna za oblikovanje zob stranskega predela zobnih lokov.



Slika 38: Knjižnice oblik zob (lastni vir).

Knjižnice oblik zob ne zagotavljajo vedno učinkovitega ali predvidljivega postopka, saj oblike garnitur zob včasih ne vsebujejo ustrezne oblike. Digitalna kopija naravnih zob se namreč vedno ne prenese optimalno v dano situacijo in pogosto zahteva dodatne spremembe, da bi zadovoljili estetske ali funkcionalne potrebe zobnega nadomestka.

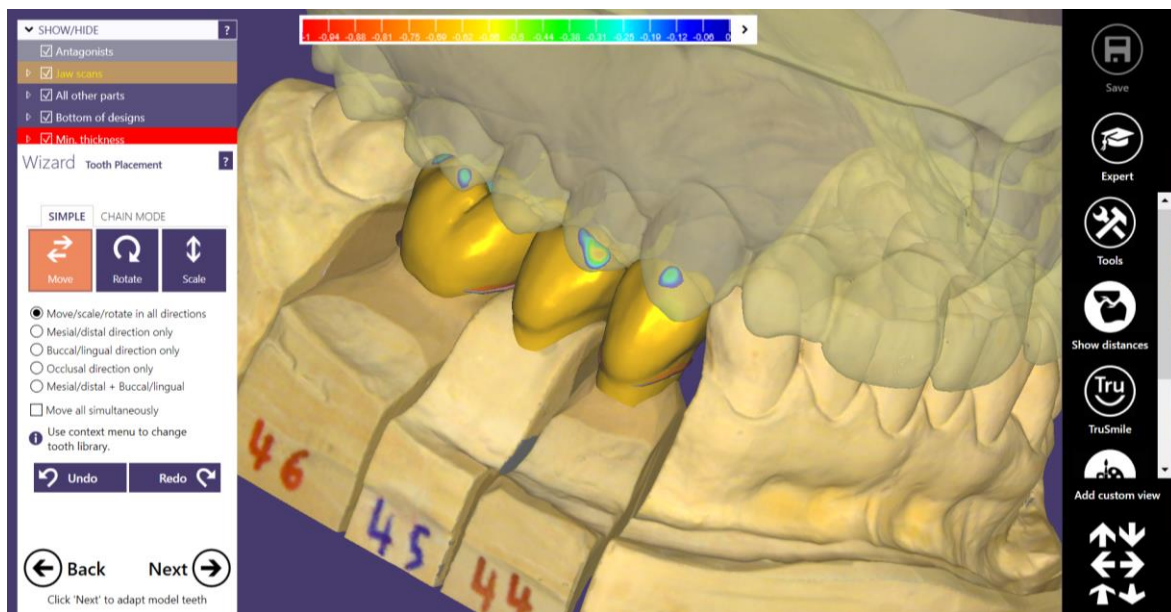
Digitalne knjižnice oblik zob omogočajo tudi komunikacijo o natančni obliki zoba med zobozdravnikom, pacientom in laboratorijskim izvajalcem, ki izdeluje dokončni protetični izdelek. Napredne programske opreme, ki združujejo dvorazsežne slike s trirazsežnimi digitalnimi datotekami, oblikovalcem omogočajo, da pridobijo želeno obliko zoba v pacientovih virtualnih ustih, kar omogoča zelo natančen predogled dokončne restavracije. Ta tehnologija, ki omogoča virtualne estetske simulacije, se imenuje navidezno oblikovanje nasmeha oz. digitalno oblikovanje nasmeha (ang. *smile design*).

4.2.8 Postavitev zob iz digitalne knjižnice

Programska oprema naloži zobe iz digitalne knjižnice in jih samodejno postavi v položaj ter s tem predlaga polno končno obliko zobnega nadomestka (Slika 39). Izkušnje in znanje operaterja o obliki in funkciji pa so potrebni, da ročno postavi in oblikuje restavracijo v funkcionalno in estetsko končno obliko. V tem koraku lahko ročno optimiziramo položaj modela zob s premikanjem, vrtenjem in spreminjanjem velikosti.

V tej fazi ni ključno, da se oblika in položaj, ki jo predlaga programska oprema, popolnoma prilega obrušnim zobem. Če je razumno nameščena glede na obrušene zobe, bo programska oprema v naslednjem koraku avtomatično prilagodila knjižnico zob obrušnim zobem na

modelu. Kasneje lahko zobne nadomestke po potrebi natančneje prilagodimo v koraku prostega oblikovanja oz. modeliranja, ki je opisano v nadaljevanju.

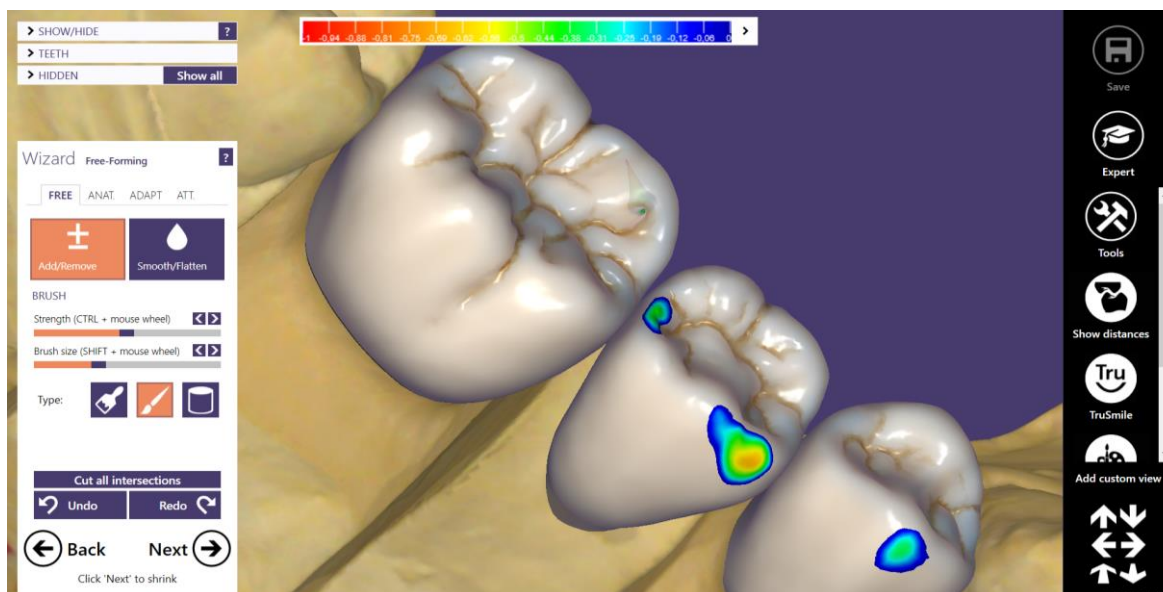


Slika 39: Predlog zobnega nadomestka za nadaljne modeliranje (lastni vir).

4.2.9 Prosto oblikovanje oz. modeliranje

V tem koraku lahko operater z orodji, ki imajo podobno funkcijo kot klasični modelirni nožek ali sonda, prostoročno dodaja, odstranjuje ali gladi material, da obliko restavracije optimalno prilagodi zobnemu loku. Ta korak je podoben klasičnemu modeliranju z voskom, pri katerem laboratorijski izvajalec ročno oblikuje voščeno ogrodje.

Med postopkom prostega oblikovanja je za operaterja zelo koristen vizualni prikaz razdalje do antagonistov in sosednjih zob. S tem podatkom lažje prilagajajo obliko restavracije sosednjim zobem in antagonistom. Programska oprema prikaže stike, presečišča in bližine restavracij z antagonistami in sosednjimi zobmi v barvah, ki so prikazane na vsaki načrtovani obliki zobnega nadomestka. Barvna lestvica od rdeče do temno modre prikazuje razdalje in prekrivanja med izbranimi strukturami (Slika 40).



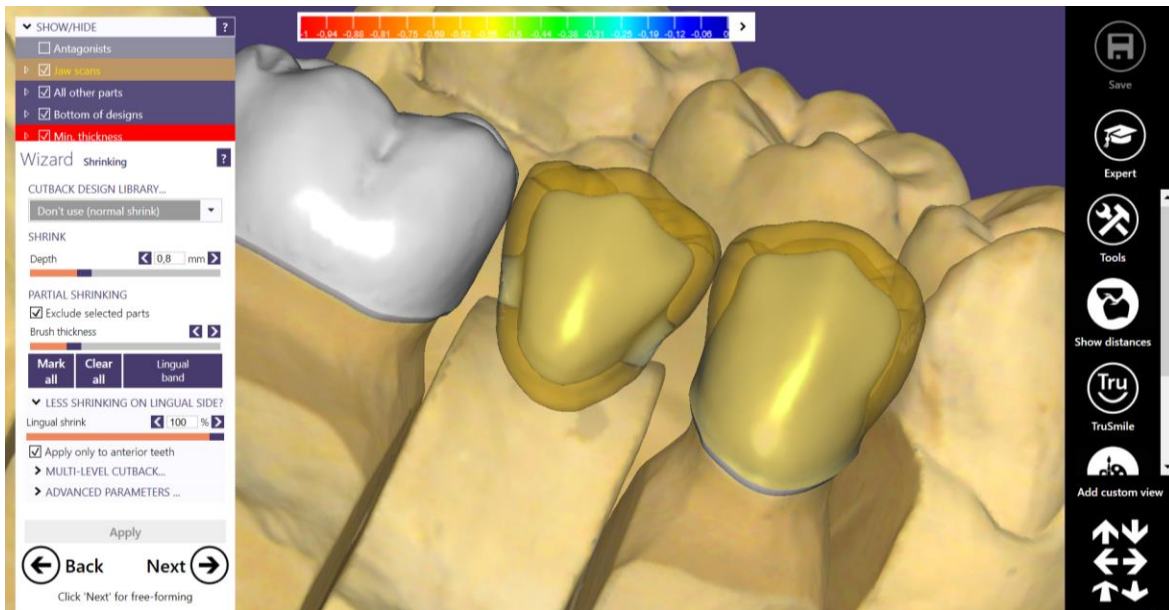
Slika 40: Barvna lestvica vizualizacije razdalje med digitalno modelacijo (lastni vir).

Po virtualni statični okluziji je na voljo dodatna funkcija za vizualizacijo stikov, ki se pojavijo ob simulaciji dinamične okluzije.

V naslednji fazi sledi samodejno prilagajanje okluzijskih stikov antagonistom, stikov s sosednjimi zobmi in oblikovanje členov v odnosu do dlesni. Obstajata dve osnovni vrsti prilagoditve okluzije: statična ali dinamična, pri čemer se dinamična prilagoditev izvaja z dodatnim modulom za uporabo virtualnega artikulatorja.

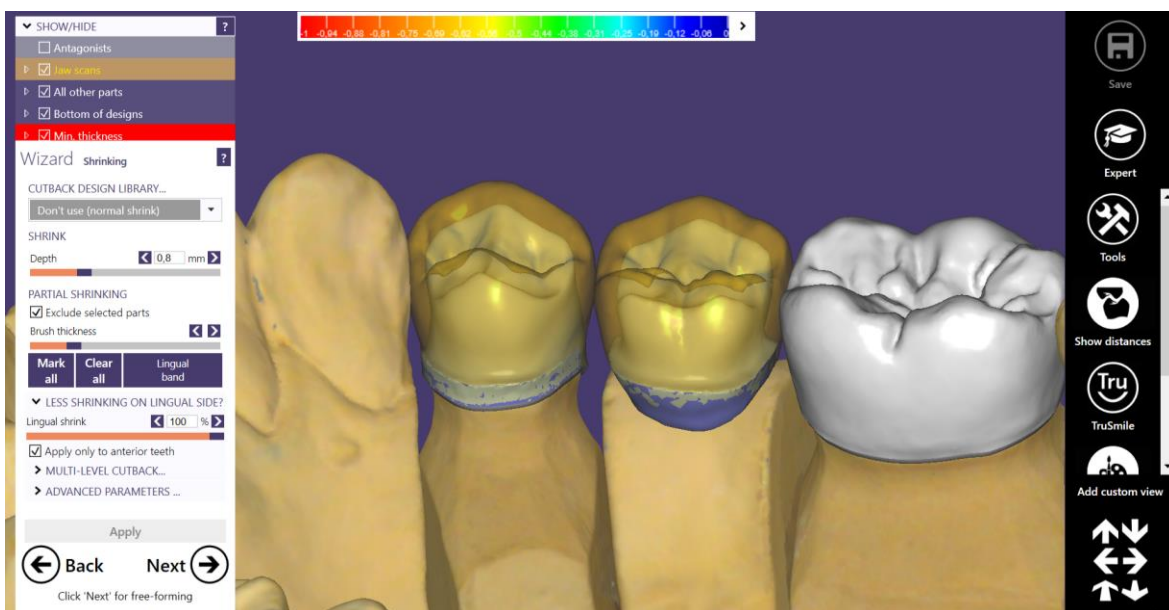
4.2.10 Oblikovanje pomanjšane oblike zobnega nadomestka

Po dokončani digitalni modelaciji končne oblike restavracij je za oblikovanje mostovne konstrukcije pri kovinsko-porcelanski tehniki na voljo korak za pomanjšanje oblike. Korak pomanjšanja ogrodja (ang. *cutback*) omogoča določitev predelov za nanašanje fasetirnega materiala oz. porcelana (Slika 41) in s tem povezanih nastavitvev. Ena izmed teh nastavitvev je določanje dela ogrodja, ki ga ne želimo reducirati, kar je pomembno pri izdelavi lingvalnega ali palatinalnega kovinskega paščka.



Slika 41: Funkcija reduciranja oblike zobnega nadomestka (lastni vir).

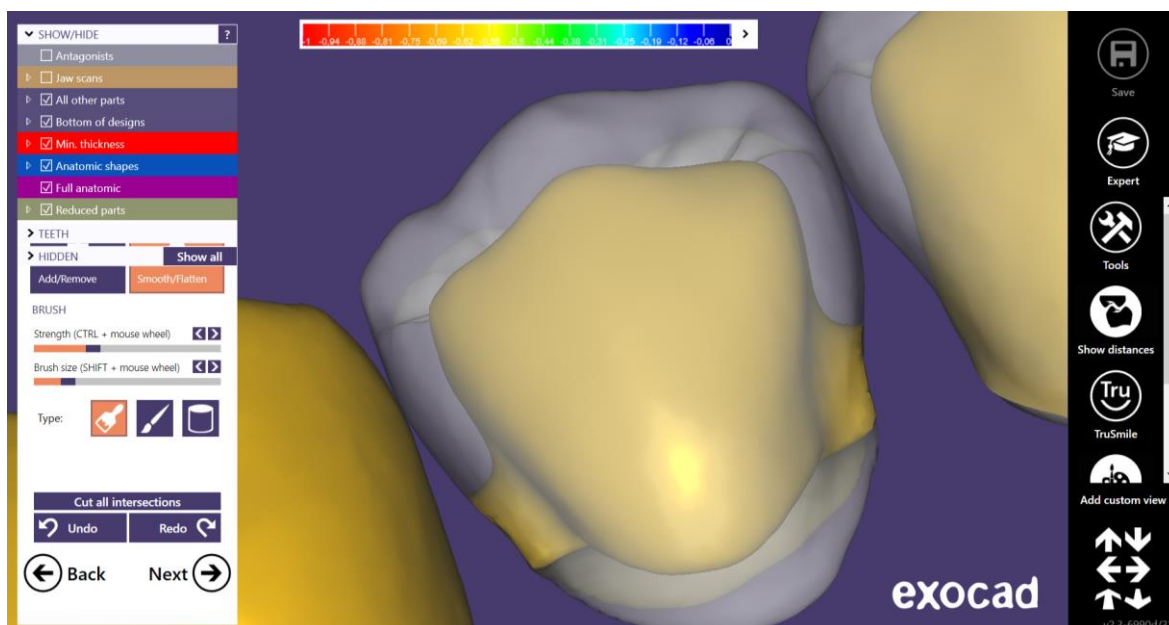
Izločitev določenih delov med pomanjšanjem dokončno oblikovane prevleke omogoča ohranitev nepomanjšane polne anatomsko oblikovane strukture. Ta postopek se lahko uporabi za izdelavo lingvalnih paščkov (Slika 42) ali za oblikovanje kovinske okluzijske ploskve, kadar na okluzijski ploskvi restavracije ni dovolj prostora za nanos porcelana.



Slika 42: Izdelava lingvalnih paščkov (lastni vir).

4.2.11 Prilagajanje pomanjšane oblike

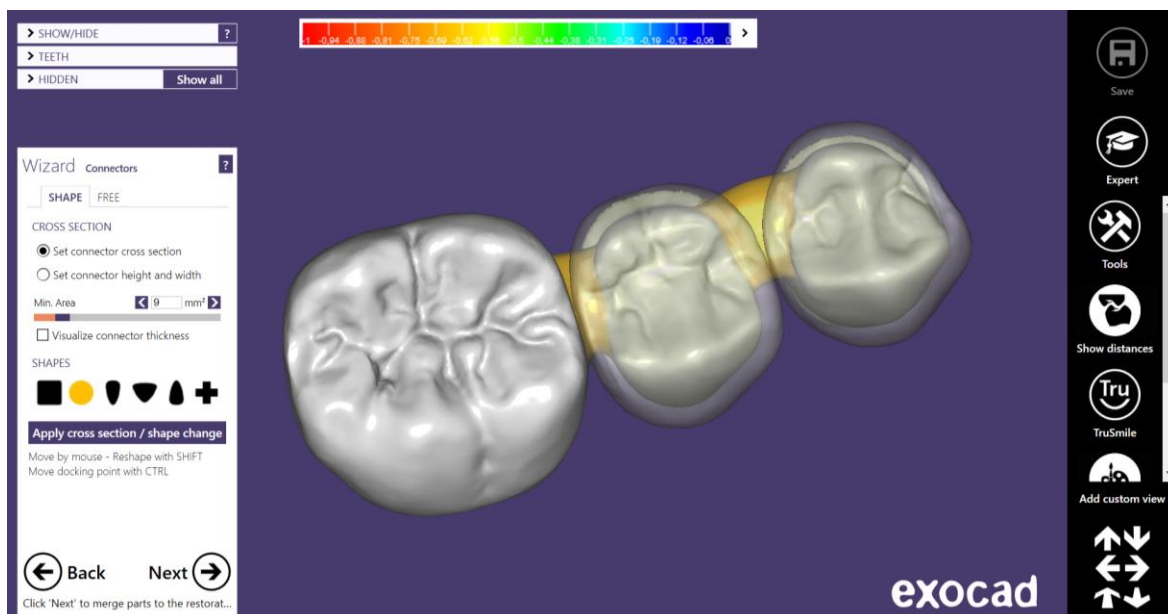
Pomanjšanemu ogrodju sledi dodatno prilagajanje, da ogrodje pridobi optimalno končno obliko. V koraku prostega oblikovanja je treba pridobiti primerno zaobljenost in podporo za porcelan (Slika 43).



Slika 43: Modelacija ogrodja za kovinsko-porcelansko tehniko (lastni vir).

4.2.12 Oblikovanje povezav

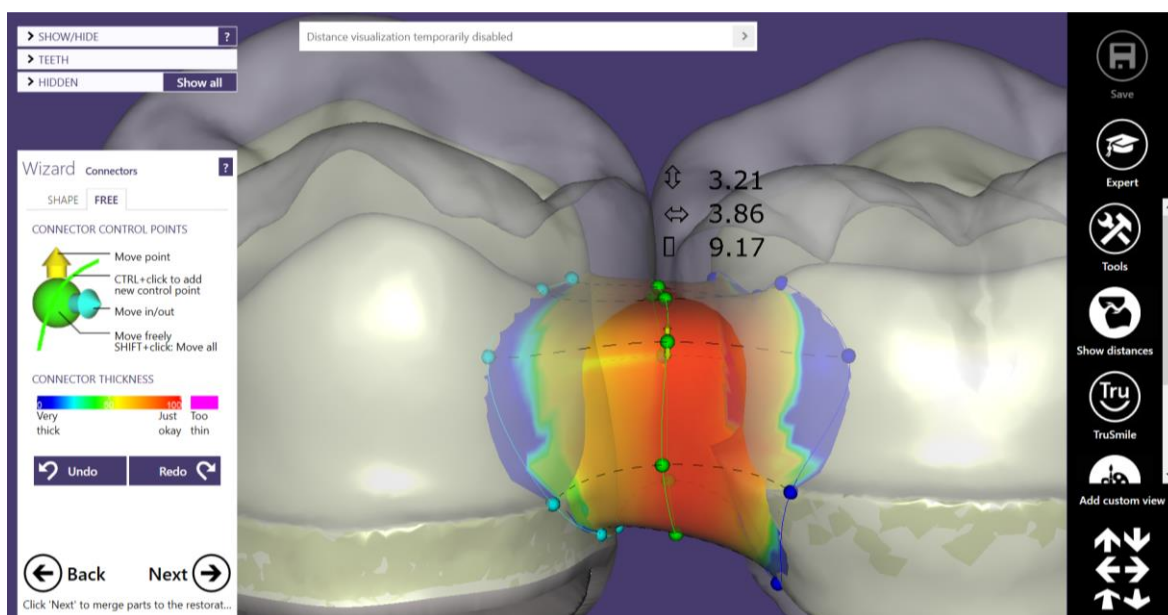
Povezave bodo ustvarjene na mestih, ki so bila predhodno določena v delovnem nalogu. Prilagoditev povezav je mogoča na različne načine, pri čemer je najmanjša velikost povezave lahko določena s površino preseka ali z njegovo višino oz. širino (Slika 44).



Slika 44: Izbira oblike povezav (lastni vir).

4.2.13 Prosto oblikovanje povezav

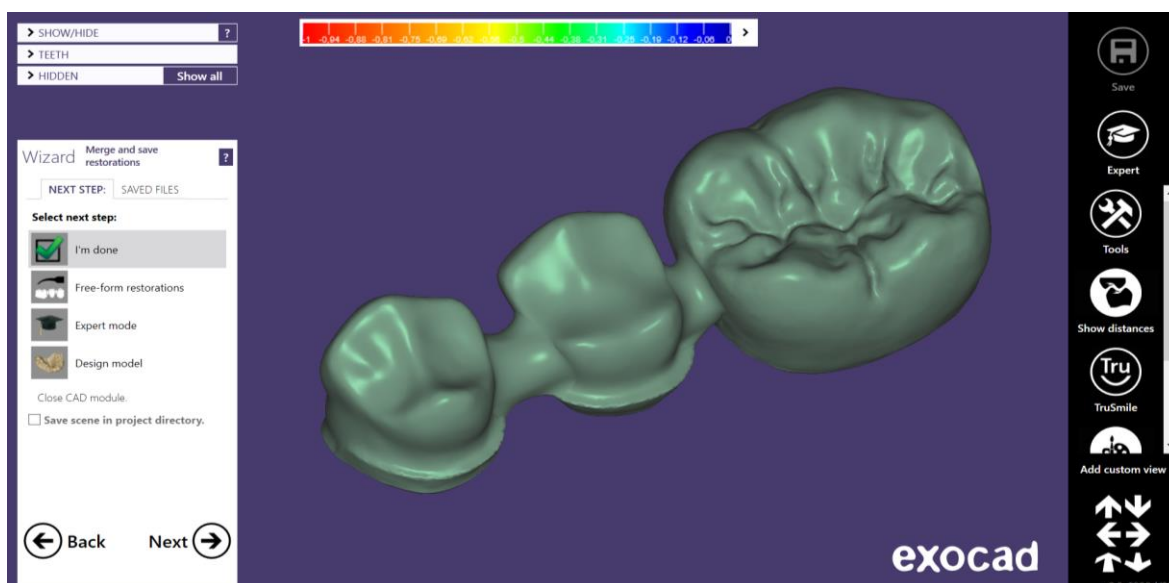
S funkcijo prostega oblikovanja povezav lahko te dodatno prilagodimo in grafično prikažemo njihovo debelino (Slika 45). Debelino povezav je mogoče urejati s premikanjem točk, ki jih lahko prosto povlečemo in spustimo v vse smeri.



Slika 45: Barvna lestvica kot pomagalo pri oblikovanju povezave med dvema prevlekama (lastni vir).

4.2.14 Združevanje posameznih elementov

Zadnji korak v programski opremi CAD je postopek »združevanja« (Slika 46), ki združuje in shrani vse posamezne elemente, ki smo jih oblikovali, (prevleke, členi, povezave itd.) v eno ali več datotek v formatu STL, ki so primerne za nadaljnjo obdelavo, na primer za rezkanje ali selektivno lasersko taljenje. V primeru sočasnega oblikovanja več posameznih restavracij pri istem pacientu se za vsako restavracijo ustvari ločena datoteka STL.



Slika 46: Združevanje posameznih elementov v posamezno datoteko STL (lastni vir).

4.2.15 Lastnosti datotek za odzematno in dodajalno izdelavo

Za izdelavo konstrukcij z aditivno metodo, kot je selektivno lasersko taljenje, je potrebna »vodotesna« mreža izhodnih podatkov z določenimi posebnimi lastnostmi:

- mreža podatkov mora biti popolnoma povezana, brez lukenj ali odprtih robov;
- notranje površine ali presečišča niso dovoljeni.

Za odzematno izdelavo z rezkanjem ni nujno, da so izpolnjene prej naštetе zahteve, saj naknadna obdelava za dodajalno izdelavo vključuje zamudne izračune. Iz tega razloga se optimizacija izvaja dodatno le, če je v prvotnem delovnem nalogu izbran material, ki narekuje izdelavo z dodajalno tehnologijo.

4.2.16 Shranjevanje datotek

Izdelano datoteko, ki prikazuje trenutno stanje oblikovane virtualne restavracije, je treba ustrezno shraniti v projektno mapo delovnega naloga, da bo pripravljena za nadaljnji postopek CAM.

V poglavju o oblikovanju zobnih nadomestkov smo na kratko predstavili osnovne korake za oblikovanje mostovnega ogrodja v kovinsko-porcelanski tehniki, ki predstavlja le eno izmed številnih dostopnih vrst programske opreme CAD. Za boljše razumevanje obsega uporabe in raznolikosti razpoložljive programske opreme CAD na trgu, naštevamo nekaj dodatnih trenutno razpoložljivih modulov programske opreme CAD:

- modul za izdelavo restavracij na implantatih
- modul za oblikovanje gredi
- modul za oblikovanje delovnih modelov
- modul za oblikovanje opornic
- modul za oblikovanje začasnih restavracij
- modul za oblikovanje delne proteze
- modul za oblikovanje totalne proteze
- modul za dejanski prikaz zobnih nadomestkov
- modul za virtualni artikulator
- modul za uvoz gibanja čeljusti
- pregledovalnik DICOM
- modul za digitalno oblikovanje nasmeha
- modul zobnih knjižnic
- modul za artikulacijske priponke modelov
- modul za kirurško načrtovanje vsadkov
- modul za ortodontijo
- modul za izdelavo CAM

Z nenehnim izboljševanjem programske opreme CAD, ki jo ponuja vse več proizvajalcev, ter z raznoliko ponudbo modulov se bo digitalno načrtovanje zobnih nadomestkov še naprej izboljševalo in poenostavljalo.

4.3 Povzetek

Današnje digitalne tehnologije v zobozdravstvu omogočajo zmanjšanje analognih faz in avtomatizacijo delovno intenzivnih postopkov v zobnem laboratoriju. S stalnimi izboljšavami programske opreme CAD in raznoliko ponudbo modulov digitalno načrtovanje zobnih restavracij postaja preprostejše in učinkovitejše.

Za zobni laboratorij pomenijo te tehnologije učinkovito avtomatizacijo mehanskih oz. analognih postopkov, kot so voščena modelacija, vlaganje v vložno maso, odstranjevanje voska, ulivanje zlitin ali stiskanja keramike, ki so sicer del klasične izdelave zobnih restavracij.

Treba pa je poudariti, da bodo sodobne tehnologije v laboratorijski zobni protetiki uspešne le, če bodo podprte s celovitim razumevanjem osnov zobne protetike. Tehnologija in avtomatizacija lahko izboljšata učinkovitost, zmanjšata delovno obremenitev ter zagotovita ponovljivost rezultatov, ne moreta pa nadomestiti potrebe po izobraževanju, praksi in klinični ter tehnični presoji, ki ostajajo ključni za kakovostno protetično oskrbo.

Vprašanja:

- Ali programska oprema CAD lahko nadomesti izkušenega laboratorijskega protetika in zakaj?
- Kaj razumeš pod pojmom digitalna modelacija in katera orodja so pri tem na voljo?
- Naštej in opiši osnovne korake digitalnega oblikovanja mostovne konstrukcije v kovinsko-porcelanski tehniki.
- V katerem primeru lahko za oblikovanje zobnega nadomestka uporabimo zrcaljenje in kdaj kopiranje?
- Katere lastnosti izhodnih podatkov zahteva dodajalna tehnologija?
- Katere module programske opreme CAD poznaš?
- Kako zagotovimo statično oz. dinamično okluzijo med oblikovanjem zobnega nadomestka?
- V katerih primerih moramo biti še posebej pozorni na smer vstavitve oblikovanih zobnih nadomestkov?
- V katerem primeru uporabimo digitalno knjižnico oblik zob?

5 RAČUNALNIŠKO PODPRTA IZDELAVA

UČNI CILJI

Ob koncu tega poglavja mora bralec znati:

- pojasniti razliko med subtraktivnimi in aditivnimi postopki izdelave CAD/CAM,
- opisati postopek rezkanja CAD/CAM in vključenih komponent,
- razpravljati o razlikah med rezkalnimi stroji CAD/CAM,
- pojasniti različne vrste aditivnih postopkov CAD/CAM.

Uvod

Od petdesetih let prejšnjega stoletja se v predelovalni industriji (npr. avtomobilski, letalski in vesoljski) zanašajo na motorizirana orodja, ki se namesto ročno samodejno krmilijo s programiranimi ukazi, z namenom učinkovitejšega, natančnejšega in predvidljivejšega postopka izdelave.

Ta postopek numeričnega krmiljenja (ang. *Numerical Control* – NC), ki velja za prvo računalniško podprto izdelavo (CAM), je bil leta 1952 razvit na Massachusettskem inštitutu za tehnologijo (ang. *Massachusetts Institute of Technology* – MIT) z namenom boljše in hitrejše izdelave določenih izdelkov in njihovih komponent. Danes je NC računalniško nadzorovan (ang. *Computer Numerical Control* – CNC), računalniška tehnologija pa je gonilna sila nadzora in izvajanja proizvodnih postopkov.

V bistvu CNC vodi neposredna motorna orodja za rezanje materiala do vnaprej določene oblike in velikosti z vrsto avtomatiziranih mehanskih korakov. Ta postopek odstranjuje material in se zato šteje za subtraktivno izdelavo ter običajno vključuje rezanje, rezkanje in brušenje materialov. Danes je računalniško podprto oblikovanje (CAD) sestavni del izdelave CNC, ki se zdaj uporablja za avtomatizacijo katerega koli proizvodnega postopka, ki zahteva gibanje in delovanje (npr. rezanje, upogibanje, varjenje, šivanje itd.).

Datoteke računalniških programov ustvarijo željeno zasnovo izdelka in jo nato prevedejo v operativne ukaze za proizvodni postopek.

5.1 Računalniško podprta izdelava (CAM) v zobozdravstvu

Tehnologija računalniško podprte izdelave (CAM) je bila kot modul v delovnem postopku (CAD/CAM) predstavljena strokovni javnosti v zgodnjih osemdesetih letih prejšnjega stoletja. Razvita je bila z namenom boljše in hitrejše izdelave protetičnih izdelkov za oskrbo pacienta.

Uporaba keramike visoke trdnosti na osnovi aluminijevega in cirkonijevega oksida za ogrodja, ki jih je mogoče izdelati samo z uporabo tehnologije CAD/CAM, je dodatno prispevala k razvoju digitalnih tehnologij v zobozdravstvu. Kot posledica tega trenda je v zadnjih letih prišlo do opaznega povečanja števila tehnoloških sistemov CAD/CAM s povsem digitalnimi delovnimi postopki, pa tudi samih naprav CAM, ki so na voljo v zobozdravstvu.

Enote za izdelavo CAM delujejo po aditivnem ali subtraktivnem načinu. Prve tehnologije CAM so se skoraj izključno nanašale na rezkanje restavracije iz bloka materiala (surovca) z rezkali, diamantnimi brusnimi sredstvi ali diamantnimi ploščami. Ta pristop, pri katerem se material odstrani, da se pridobi želena oblika, je znan kot odvzemalna oz. subtraktivna tehnologija. Pri tem se material odšteje od bloka surovca, da ostane želeni oblikovani del (npr. zobni nadomestek). Materiali, na voljo za to uporabo, so zlitine, kompoziti, polimeri, poliamid, titan ter različne vrste silikatne in oksidne keramike. Uporabljeni bloki surovca so lahko monolitni ali večplastni. Trenutno so predmeti, izdelani iz tovarniško pripravljenih materialov s subtraktivnimi tehnikami, v primerjavi s predmeti, izdelanimi z aditivno tehniko, homogonejši. Restavracije, izdelane subtraktivno, kažejo prednosti z vidika trdnosti in biokompatibilnosti.

Slabost subtraktivne tehnologije je velika količina odpadnega materiala. Približno 90 % surovca se odstrani, da se ustvari določen zobni nadomestek, kar je razlog za vse pogostejšo uporabo aditivnega pristopa v tehnologiji CAD/CAM.

Pri aditivnem pristopu oz. dodajalni tehnologiji je končni izdelek izdelan z nanašanjem oz. dodajanjem materiala v slojih in zato se pogosto uporablja tudi izraz slojevita tehnologija.

Ti postopki izdelave uporabljajo prah kovine, keramike ali polimer in tvorijo izdelek s strjevanjem prahu ali umetnih smol na izbranih predelih s tehnologijami, kot so selektivno

lasersko taljenje, stereolitografija ali 3D-tiskanje. Te metode se uporabljajo pri izdelavi zobnih nadomestkov, vendar je uporaba keramike še v razvojni fazi.

Postopek CAM se začne, ko je načrt zobnega nadomestka s programsko opremo CAD končan in se 3D-podatki CAD prenesejo v programsko opremo CAM. Ta virtualni model zobnega nadomestka pretvori v določen niz ukazov. Ti pa nadzorujejo enoto CAM med postopkom izdelave načrtovane restavracije.

Najpogostejši format datotek geometrijskih 3D-podatkov za vnos v programsko opremo CAM je format STL z modelom triangulacijskega izračuna. Ti geometrijski 3D-podatki se s prenosom podatkov posredujejo programski opremi CAM za izdelavo objekta.

5.2 Podatkovni postopki CAM

Podatkovni postopki v tehnologiji CAD/CAM vključujejo oblikovanje, obdelavo in prenos podatkov v digitalni obliki med različnimi fazami oblikovanja in izdelave.

Po vnosu podatkov v programsko opremo CAM je prvi korak predprocesiranje, ki temelji na podatkih STL. Pri tem programska oprema poveže in nadzoruje model CAD s posebnim strojnim postopkom za delovanje v dani osi in izvajanjem zahtevane funkcije, neodvisno od subtraktivne ali aditivne narave proizvodnega postopka. Merodajni so zgolj podatki modela CAD, ki so posredovani sistemu. V primeru subtraktivnega načina izdelave (rezkanje) so med stopnjo predprocesiranja programske opreme CAM na voljo podatki o velikosti objekta, materiala in specifikacije rezkalnih orodij, povezane z modelom CAD, ki jih je izračunal procesor.

V drugi fazi obdelave podatkov se pripravi obdelovalni postopek v skladu s predhodno obdelanimi podatki. V tej fazi se izračunajo različna zaporedja obdelave, ki jih bo orodje uporabilo. Da bi algoritem to izvedel, mora poznati gibalne sposobnosti stroja ter vse podatke v zvezi s hitrostjo rezkanja in hitrostjo podajanja podatkov, ki je potrebna za določeno pot posameznega orodja. Ta izračun se konča s podatki v posebnih formatih CAM, ki omogočajo komunikacijo z industrijskimi standardnimi formati stroja za NC.

V zadnjem postopku izračuna podatkov se zagotovijo nadaljnja navodila o gibanju in hitrosti v primerljivem nešifriranem formatu datoteke za zagon programa NC.

Prenos, spreminjanje in prilagajanje modela CAD določeni programski opremi CAM je avtomatski postopek in ne zahteva ročnega programiranja. Tako je mogoče delovni postopek CAD/CAM vzdrževati kot natančen, sinhroniziran postopek z združljivim pretokom podatkov. Vsak stroj CAM ima svojo posebno programsko opremo, ki je prilagojena uporabljenemu materialu. Programsko opremo CAM in proizvodni stroj drug drugemu prilagaja proizvajalec stroja. Pri večjih profesionalnih enotah CAM lahko programsko opremo uporabnik izbere individualno in jo vgradi v enoto.

Združljivi pretok podatkov je mogoče doseči le, če so vse komponente programske in strojne opreme združljive. Proizvajalci strojne in programske opreme zato na splošno zagotavljajo združljive sisteme, ki so dobro preizkušeni v praksi. Seveda mora združljivost vključevati tudi ustrezne materiale.

5.3 Različni proizvodni pristopi računalniško podprte izdelave

Glede na lokacijo enot CAM v zobozdravstvu ločimo različne proizvodne pristope. Lokacije so:

- ordinacija
- laboratorij
- proizvodni center

5.3.1 Ordinacija

V ordinaciji

Pri tej proizvodni različici so vsi sestavni deli tehnologije CAD/CAM v zobozdravstveni ordinaciji, vključno s kompaktno namizno rezkalno enoto (Slika 47).

Zobni nadomestek je v celoti izdelan v ordinaciji (ang. *chairside*), brez sodelovanja zobnega laboratorija. Instrument za digitalizacijo je v tem primeru IOS, ki nadomesti običajni odtis. To prihrani čas in izvajalcem omogoča, da pacientom v zgolj eni obravnavi zagotovijo dokončno restavracijsko oz. protetično oskrbo z izdelavo indirektnih restavracij v ordinaciji. Keramični inleji se po tem sistemu izdelujejo že 30 let.



Slika 47: Mini štiriosna rezkalna enota za ordinacije (lastni vir).

Zunaj ordinacije

V teh primerih je instrument za digitalizacijo podatkov prav tako IOS. Tako zbrani podatki se po spletu pošljejo v centralni računalnik zobnega laboratorija. Od tam lahko zobni laboratorij s primerno programsko opremo CAD prenese podatke za nadaljnjo obdelavo. Na koncu se laboratorijski izvajalci odločijo, ali bodo zobni nadomestek izdelali sami ali bodo podatke o načrtovani obliki izdelka poslali v proizvodni center na končno izdelavo.

5.3.2 Laboratorij

Ta način izdelave temelji na klasičnem odtiskovanju. Zobozdravnik odtis pošlje v zobni laboratorij, kjer izdelajo mavčni model in nato delo nadaljujejo s tehnologijami CAD/CAM. Laboratorijski optični 3D-bralnik se uporablja za pridobivanje trirazsežnih podatkov z mavčnih modelov ali analognih elastomernih odtisov in obdelavo teh podatkov s programsko opremo za oblikovanje. Na podlagi pridobljenih podatkov se restavracija izdela s posebnimi 3D-tiskalniki in rezkalnimi stroji (Slika 48), ki so prav tako v zobnem laboratoriju. Natančnost in primernost izdelka je mogoče preveriti na mavčnem delovnem modelu in po potrebi popraviti. Ogradje za kovinsko-porcelansko prevleko laboratorijski izvajalec izdela z ročnimi tehnikami fasetiranja za dokončno izdelavo prevleke.



Slika 48: Kompaktna petosna rezkalna enota za suho in mokro rezkanje (lastni vir).

5.3.3 Proizvodni center

Tretja možnost računalniško podprte izdelave zobnih nadomestkov je izdelava v proizvodnih centrih. Zobni laboratorij je po spletu povezan s proizvodnim centrom in postopek izdelave poteka v treh korakih:

1. Osnovno oblikovanje CAD izvedejo v zobnem laboratoriju in zasnovo pošljejo v proizvodni center.
2. Izdelek se izdelava s tehnologijo CAM v proizvodnem centru in nato pošlje nazaj v zobni laboratorij.
3. V zobnem laboratoriju se izvedejo dokončni postopki (npr. fasetiranje oz. nanos porcelana).

Ker 1. in 3. delovni korak potekata v laboratoriju in le 2. korak centralno, ostaneta digitalno načrtovanje in dokončna izdelava restavracije v pristojnosti laboratorijskega izvajalca.

Prednost povezave zobnega laboratorija s proizvodnim centrom je v nižjih investicijskih vložkih. Nabaviti je treba zgolj instrument za digitalizacijo in programsko opremo. Poleg tega ta metoda ponuja več neodvisnosti, saj ni vezana zgolj na določeno proizvodno tehnologijo.

Številni proizvodni centri zobnim laboratorijem, ki nimajo optičnega bralnika, ponujajo možnost, da v center pošljejo samo delovne modele. V proizvodnem centru digitalno zajamejo podatke in z eno od tehnologij CAM izdelajo ogrodje. Tako končna obdelava ogrodja še vedno poteka v zobnem laboratoriju. Lahko pa zobozdravniki odtis obrušeni zob pošljejo neposredno v proizvodni center. Tovrstna izdelave je na voljo za inleje, delne prevleke, luske, prevleke, mostičke in opornike za vsadke.

5.4 Izdelava z odvzemalno tehnologijo

Značilnost subtraktivne tehnologije je odvzemanje materiala z rezkanjem bloka materiala do želene oblike. Taki stroji zahtevajo dokaj zapleteno strojno opremo, saj se morajo vsi postopki izvajati samodejno:

- Na začetku mora stroj določiti skupni načrt, po katerem bo rezkal občutljivo in tanko strukturo iz trdnega bloka keramike. Bistvo tega koraka je ohranjanje trdnosti surovca, da se prepreči njegov zlom med strojno obdelavo. Notranji deli zobnih nadomestkov in njihovi robovi so tako strojno obdelani pred oblikovanjem zunanjih oblik in ločitvijo izdelka od surovca.
- Nato mora stroj izračunati poti vseh orodij, ki jih bo uporabljal med postopkom izdelave. Prav tako mora optimizirati orientacijo orodij in obdelovanca drug glede na drugega.
- Stroj mora izbrati najprimernejše orodje za oblikovanje vsakega dela restavracije.
- Stroj mora pozorno spremljati obrabo svojih orodij in ustrezno spremeniti tolerance, če so bile presežene (Toleranca je dimenzijsko območje, znotraj katerega se delo šteje za sprejemljivo.).
- Stroj mora imeti ustrezno hlajenje, da se prepreči pregrevanje zaradi rezkanja. Prav tako mora stroj samodejno očistiti vse ostanke, ki nastanejo med strojno obdelavo.
- Stroj mora voditi dnevnik vseh operacij, izvedenih na vsakem izvedenem delu.

Rezkalna orodja so lahko različnih oblik, vsa pa delujejo pod obilnim hlajenjem vode ali zraka pri suhem rezkanju. Glede na usmerjenost orodja na obdelovanec ima večina sodobnih strojev pet osi, kar pomeni, da obstaja pet načinov relativne svobode med orodjem in obdelovancem.

Prilagojeni rezkalni stroji oz. rezkalne enote CNC, ki delujejo z do petimi prostostnimi stopnjami, lahko ogrodje prilagodijo posameznemu obrušenemu zobu ali vsadku. Za reprodukcijo kompleksnih ogrodij z več vsadki z okluzijsko vijačno povezavo vsadka s prevleko ali za restavracije s kompleksno morfologijo anatomskih topografij in oblik so potrebni zelo zmogljivi stroji. Manjši stroji CAM ali naprave za zobozdravstvene ordinacije z omejenimi prostorskimi zmogljivostmi so namenjeni le za manjše fiksne zobne nadomestke oz. restavracije, kot so inleji, onleji, estetske fasete ali solitarne prevleke. Manjši stroji so omejeni tudi na uporabo kompozitnih in keramičnih materialov, niso pa primerni za kovinske zlitine ali titan (Tabela 1).

Tabela 1: Splošen pregled trenutno uporabljenih materialov za subtraktivne tehnologije (✓ = na voljo) (lastni vir).

Dentalni materiali:		KERAMIKA					ZLITINE			POLIMERI			
		Silikat	Disilikat	Cirkonijski oksid	Aluminijev oksid	Steklokeramika	Plemenite kovine	Neplemenite kovine	Titan		Kompoziti	Hibridni kompoziti	Akrihati
Tehnologija izdelave:													
ODVZEMALNA	Rezkanje			✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓
	Brušenje	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓

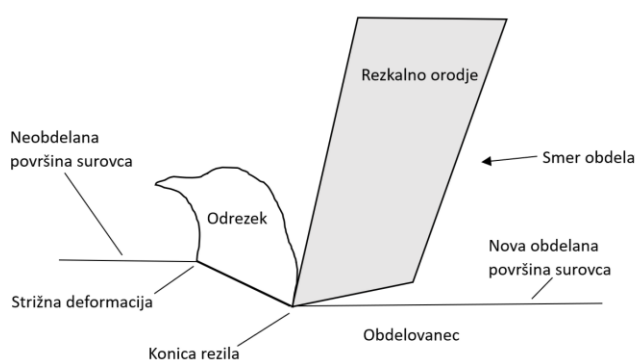
5.4.1 Vrste obdelave pri subtraktivni tehnologiji

Brušenje in rezkanje (ang. *grinding and milling*) sta dva različna postopka obdelave, ki se uporabljata v dentalnih strojih CAM za izdelavo protetičnih izdelkov, kot so prevleke, mostički in luske.

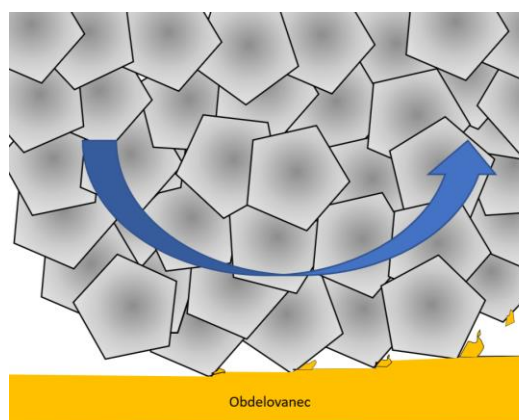
Na splošno se v strojih za izdelavo protetičnih izdelkov uporabljata brušenje in rezkanje. Ključna razlika med obema postopkoma je v vrsti uporabljenega orodja in načinu, kako se material odstrani z diska ali bloka surovca, kar narekuje izbor materiala.

Izraza rezkanje in brušenje se pogosto mešata in v literaturi uporabljata kot sopomenki za postopek subtraktivnega izdelovanja. Praviloma se to nanaša na glavni orodji, ki se uporabljata:

- **rezkanje** (Slika 49) je opredeljeno kot obdelava z geometrijsko definiranimi rezalnimi robovi;
- **brušenje** (Slika 50) je obdelava z negeometrijsko definiranimi rezalnimi robovi (npr. z brusnim papirjem).



Slika 49: Potek oblikovanja odrezkov rezkalnega orodja (lastni vir).



Slika 50: Nedefiniran potek oblikovanja odrezkov diamanta (lastni vir).

5.4.2 Orodja rezkalnih enot

Karbidna rezkala

Orodja, ki se običajno uporabljajo v rezkalnih napravah, so eno- ali večrezna karbidna rezkala (npr. dvorezno kroglično rezkalo) (Slika 51). Izdelana so iz materiala, ki je trši od obdelovanca. Rezkalo služi za oblikovanje in ločevanje odrezkov od osnovnega delovnega materiala (Slika 49). Manjše število rezalnih robov na rezkalu povzroči večje ostružke, kar pospeši postopek rezkanja, a povzroči tudi večjo obrabo rezkala. Prednosti rezkala z dvojnim robom in geometrijsko definiranimi rezalnimi robovi sta hitro odstranjevanje materiala ter manjša obraba pri zapletenih tehnikah rezkanja in pri manjšem podajanju materiala. Poleg

tega lahko orodja za rezkanje razdelimo na prevlečena ali neprevlečena. Zaradi svoje visoke togosti je volframov karbid eden najpogosteje uporabljenih premaznih materialov.



Slika 51: Rezkalo z dvojnimi robovi in geometrijsko definiranimi rezalnimi robovi (lastni vir).

Velikost rezkala (Slika 52) je odvisna od delovnega koraka (večja rezkala za grobo obdelavo, manjša za končno obdelavo), pa tudi od izbranega materiala. Postopki strojne obdelave so običajno razdeljeni v dve kategoriji, ki se razlikujeta po namenu in okoliščinah rezkanja. Prvi korak se imenuje grobi rez, ki se izvede za čim hitrejšo odstranitev velike količine materiala z začetnega obdelovanca. Cilj je izdelati obliko, ki je čim bližja želeni obliki, vendar z nekaj materiala, ki ostane na obdelovancu za kasnejšo končno obdelavo. Drugi korak, končni rez, se uporablja za dokončanje dela ter doseganje končnih dimenzij in končne površine.



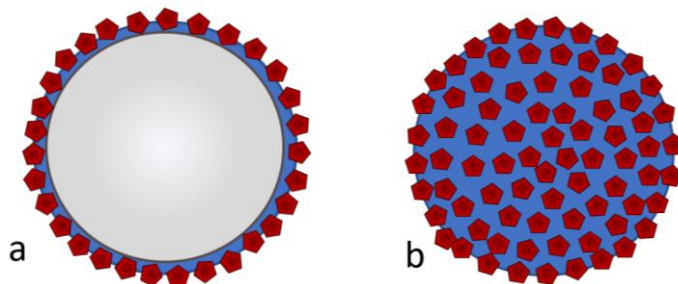
Slika 52: Različne oblike in velikosti rezkal (vir: Interdent).

Diamantni brusi

Naprave za brušenje uporabljajo diamantne svedre, ki imajo diamantna zrna različnih velikosti vdelana v kovinsko matrico (Slika 53). Matrica je običajno sestavljena iz volframovega karbida. Površinsko prevlečene diamantne bruse prikazuje Slika 54a in popolnoma sintrane Slika 54b.



Slika 53: Diamantni brus z diamantnimi zrnji, vdelanimi v matrico (lastni vir).



Slika 54: Površinsko prevlečeni (prečni prerez) (a) in popolnoma sintrani (b) diamantni brus (lastni vir).

Površinsko prevlečena brusna orodja ohranijo svojo obliko, vendar postanejo topa, medtem ko popolnoma sintrana brusna sredstva ohranjajo ostrino, ampak izgubljajo svojo primarno obliko. Uporaba popolnoma sintranih orodij zaradi nenehnega spreminjanja oblike orodja zahteva pogosto (ponovno) kalibracijo naprave CAM, zato se jih uporablja vse redkeje. Velikost in oblika brusa je odvisna od delovnega koraka in tudi od izbranega materiala (Slika 55).



Slika 55: Različne oblike in velikosti brusnih orodij (vir: Interdent).

Velikost orodja je tista, ki pri subtraktivni metodi omejuje možnost izdelave določenega izdelka. Izdelati je mogoče zgolj oblike, ki so dostopne z orodjem za obdelavo v enoti CAM (Slika 56). To je treba upoštevati že pri načrtovanju zobnega nadomestka in brušenju zob.



Slika 56: Primer ozke prevleke oz. nosilca, nedostopnega za orodje CAM (lastni vir).

5.4.3 Vrste rezkalnih enot

Dentalne rezkalne enote razlikujemo po več dejavnikih, med katerimi so:

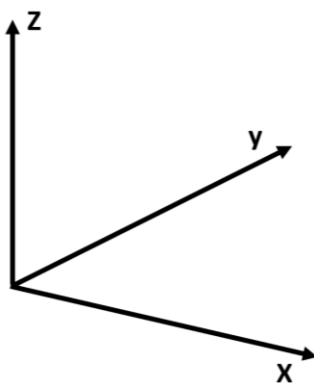
- število osi,
- sposobnost mokre oz. suhe obdelave,
- natančnost izdelave,
- velikost stroja,
- izhodne zmogljivosti.

5.4.3.1 Število osi in pravokotni koordinatni sistem (referenčni sistem)

Koordinatni sistem stroja CNC določi proizvajalec in ga ni mogoče spreminjati. Izhodiščna točka strojnega koordinatnega sistema je določena in njen položaj ni spremenljiv. Premiki orodja so vedno definirani v standardiziranem, pravokotnem koordinatnem sistemu. Razlikujemo linearne (x, y, z) in rotacijske osi (A, B, C). Obdelovalne stroje lahko ločimo glede na število gibljivih osi v tem koordinatnem sistemu.

Triosne naprave

Triosne naprave imajo stopnje gibanja v treh prostorskih smereh. Točke poti obdelave so preprosto določene s koordinatami x, y in z (Slika 57). Naložba v programsko opremo CAM za izračun poti obdelave je zato v tem primeru minimalna. Obdelava podvisnih mest, divergenc osi in konvergenca ni mogoča ter običajno zahteva navidezno blokiranje takih predelov. Vse triosne naprave, ki se uporabljajo v zobozdravstvu, lahko med obdelavo notranjega in zunanega dela izdelka del z vpetim blokom materiala obrnejo za 180 stopinj. Prednosti teh naprav so kratki časi obdelave in poenostavljeno krmiljenje na podlagi treh osi.



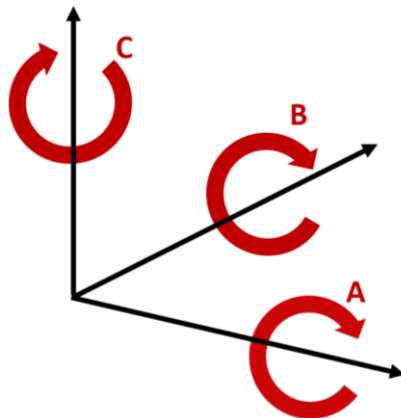
Slika 57: Koordinate treh prostorskih osi x, y in z (lastni vir).

Štiriosne naprave

Poleg treh osnovnih prostorskih dimenzij imajo te naprave še eno dodatno dimenzijo, ki omogoča rotacijo okoli ene od linearnih osi, kot je prikazano na Sliki 62. To rotacijo običajno omogoča vrtljivo držalo za surovce. Zaradi tega je mogoče lažje in hitreje izdelati zobne nadomestke, kar pripomore k prihranku materiala in časa pri obdelavi.

Petosne naprave

Pri petosni napravi je poleg treh prostorskih dimenzij in vrtljivega držala na voljo možnost vrtenja rezkalnega vretena. Druge naprave dosegajo peto os tudi z vključitvijo držala, ki se vrte okoli dveh osi (Slika 58). To omogoča strojno obdelavo kompleksnih geometrij s previsi; na primer zobni nadomestek spodnje čeljusti na konvergentnih opornikih ali dele vsadkov, ki zahtevajo izjemno visoko natančnost.



Slika 58: Od štiri- do petosne naprave imajo eno ali več dodatnih, vrtljivih osi (lastni vir).

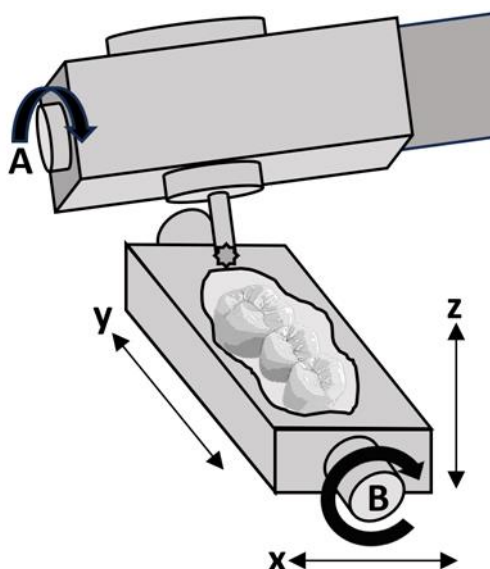
Pet osi gibanja se nanaša na različne smeri, v katerih se rezkalno orodje lahko premika, da ustvari želeno obliko zobnega nadomestka. Pet osi gibanja je:

- **Os z:** os z se nanaša na smer globine, v kateri se rezkalno orodje premika navzgor in navzdol.
- **Os x:** os x se nanaša na vodoravno smer, v kateri se rezkalno orodje premika od leve proti desni.
- **Os y:** os y se nanaša na navpično smer, v kateri se rezkalno orodje premika naprej in nazaj.
- **Os A:** os A je rotacijska os, ki omogoča, da se rezkalno orodje vrte okoli osi x, ki je pravokotna na zobni lok.
- **Os B:** os B je rotacijska os, ki omogoča, da se rezkalno orodje vrte okoli osi y, ki je vzporedna z zobnim lokom.

Rotacije osi A in B so bistvene za rezkanje zobnih nadomestkov s kompleksnimi oblikami in obrisi, kot so oporniki vsadkov, ki zahtevajo kotne vijačne kanale. Rotacijske osi

rezkalnemu orodju omogočajo tudi dostop do težko dostopnih delov, kar zagotavlja natančnost in pravilnost končnega izdelka.

Obdelovanec (Slika 59) se lahko premika vzdolž treh ravnin v prostoru in rotira na svoji dolgi osi. Obdelovalna glava se prav tako vrti. Ko združimo vse te gibe, lahko orodje doseže vse dele obdelovanca.



Slika 59: Pet osi, s katerimi lahko orodje doseže vse dele obdelovanca (lastni vir).

Trenutno so na voljo dentalne rezkalne enote s tremi, štirimi in petimi osmi. V nekaterih primerih lahko bolj dovršeni rezkalni stroji preklopijo s trisosne nastavitve za preproste izdelke na petosno nastavitvev za zapletenejšje izdelke. Število osi prav tako neposredno vpliva na čas, potreben za rezkanje. Razumevanje števila osi rezkalne enote je zato pomembno pri odločanju o izbiri rezkalnega stroja na podlagi poteka dela, za katerega se bo uporabljal.

5.4.3.2 Vrste obdelave

Večina dentalnih rezkalnih enot ima možnost mokrega ali suhega rezkanja. Nekatere rezkalne enote lahko preklaplajo med mokrim in suhim rezkanjem. Ta dejavnik vpliva na vrsto materiala, ki ga lahko z določeno enoto obdelujemo. Vrsta materiala, ki se obdeluje, narekuje, ali je treba uporabiti suho ali mokro rezkanje, nekatere materiale (npr. cirkonijevo oksidno keramiko, titan) pa lahko rezkamo mokro ali suho.

Mokra obdelava

V tem postopku diamantni brus ali rezkalo iz karbida pršenje hladilne tekočine štiti pred pregrevanjem med obdelavo (Slika 60). Poleg tega tekočina deluje kot premazni sloj in sredstvo za vezavo ostružkov. Tovrstna obdelava je potrebna za vse kovine in steklokeramične materiale, da preprečimo poškodbe zaradi ustvarjene toplote. Mokra obdelavo se priporoča tudi pri uporabi cirkonijeve oksidne keramike z visoko stopnjo pedsintranja. Prednost obdelave popolnoma sintranih surovcev je, da ne prihaja do krčenja in popačenja izdelka zaradi sintranja, možnost izpustitve faze sintranja pa v celotnem delovnem postopku prihrani tudi čas.



Slika 60: Mokra obdelava litijevega disilikata (lastni vir).

Da bi se izognili kopičenju materiala v rezkalnem stroju, je treba mokre rezkalne enote redno čistiti in tekočino menjati v določenih intervalih.

Suha obdelava

Suho rezkanje ne zahteva uporabe tekočine, za odstranjevanje odvečnega materiala se namreč uporablja zrak pod pritiskom ali vakuumsko črpanje zraka in ostankov ali kombinacijo obojega. Mehkejši materiali za rezkanje, kot je cirkonijeva oksidna keramika v zeleni fazi ali akrilat, zahtevajo čisto in suho rezkalno okolje suhih rezkalnih enot. Kljub uporabi sesalnikov je treba suhe rezkalne enote še vedno redno čistiti, da se odstrani prah in druge ostanke.

Suha obdelava se uporablja predvsem za cirkonijeve surovce z nizko stopnjo predeintranja. To ima številne prednosti, in sicer cenejša rezkalna enota in oblikovanec med suho obdelavo ne absorbira vlage. Posledično ni začetnega predeintranja ogrodja pred sintranjem. Slabost nižje stopnje predeintranja so višje vrednosti krčenja ogrodij. Vsi surovci za dentalno uporabo so predhodno segreti na stopnjo, pri kateri izginejo vsi organski dodatki, kar povzroči ustrezno stabilnost surovca. Surovci v tej fazi se že skrčijo za približno 5 %. Pri končnem sintranju je treba upoštevati še dodatnih 20 % linearnega krčenja. Nekateri proizvajalci ponujajo tudi možnost obdelave akrilatnih materialov in neplemenitih zlitin po suhem postopku.

Strojna obdelava surovca

Strojna obdelava keramike se lahko izvaja na več stopnjah sintranja keramike. Keramika je v svoji delno sintrani fazi mehka kot kreda, popolnoma sintrana keramika pa trda kot vsako gospodinjsko steklo ali keramika. Pomemben stranski učinek sintranja keramike je krčenje med sintranjem. Prednost strojne izdelave popolnoma sintranih surovcev je natančnost. Zaradi trdote keramike pa je ta pristop glede na obrabo orodij in čas, potreben za obdelavo, (približno štirikrat dlje kot pri rezkanju delno sintranega obdelovanca) neekonomičen. Druga možnost je, da imajo nekateri proizvajalci svoje proizvodne enote namenjene za delno sintrane surovce oz. surovce v zeleni fazi, pri katerih je postopek hitrejši in zahteva manj zamenjav orodja. Kot kompromis je treba tako izdelana ogrodja (Slika 61) še sintrati do polne gostote, zaradi česar se tako ogrodje skrči. Tako rezkano ogrodje mora biti zato predimenzionirano, da se kompenzira krčenje med končnim sintranjem.

Precejšnje število vrst keramike, kovin, kompozitov in drugih materialov je na voljo za obdelavo z napravami CAD/CAM in so lahko strojno obdelani. Uporabnik mora pri tem upoštevati, da vsaka komercialna naprava ne obdela vseh razpoložljivih materialov. Te zmogljivosti so še vedno odvisne od posamezne naprave.

Uporaba surovcev, izdelanih v industrijskih, to je visoko nadzorovanih razmerah, zmanjša notranje napake, iz katerih lahko izvirajo npr. razpoke, na minimum, zato tako obdelani materiali zagotavljajo vrhunsko klinično zanesljivost. Slaba stran brušenja in rezkanja keramike je, da lahko povzročita površinske napake, ki sprožijo razpoke in lom med obdelovanjem ali po njem.



Slika 61: Obdelovanci na opornikih znotraj obdelovalnega surovca (vir: Interdent).

Rotacijska ultrazvočna obdelava

Rotacijska ultrazvočna obdelava je hitra in visokokakovostna metoda obdelave za številne aplikacije. Rotacijsko ultrazvočno obdelovanje je hibridni obdelovalni postopek, ki združuje mehanizme odstranjevanja materiala diamantnega brušenja z ultrazvočnim obdelovanjem, posledica pa so višje stopnje odvzema materiala od tistih, ki jih dosežemo bodisi z diamantnim brušenjem bodisi samo z ultrazvočnim obdelovanjem. Poleg rotacije orodja je dodano nihajno gibanje v osi z. Stopnje odstranjevanja materiala, pridobljene z rotacijsko ultrazvočno obdelavo, so od šest- do desetkrat višje kot pri običajnem postopku brušenja v podobnih razmerah in približno desetkrat hitrejše od ultrazvočne obdelave. Druge prednosti tega postopka vključujejo vrhunsko površinsko obdelavo in nizek pritisk na obdelovalno površino.

5.4.4 Točnost izdelave CAM

Glavno merilo pri ocenjevanju točnosti izdelka, narejenega s tehnologijo CAD/CAM, je velikost gingivalne špranje prevleke ali inleja na meji preparacije. Klinično sprejemljiva dimenzija za gingivalno špranjo med obrušenim zobom in prevleko je v povprečju od 50 do 100 μm . Sodobne naprave CAD/CAM s svojo zadovoljivo točnostjo dobro izpolnjujejo ta pogoj, ker delujejo znotraj teh meja, čeprav se sistemi naprav, ki so jih razvili različni proizvajalci, v pristopih in uporabljenih tehnologijah precej razlikujejo.

Krčenje predsintrane keramike je tehnično občutljiv postopek. Medtem ko ta metoda daje povsem sprejemljive rezultate za posamezne prevleke, pa razširitev na več enot in ukrivljenost totalnih mostičkov lahko škodljivo vplivata na točnost konstrukcij. Razlog so težave z natančnim napovedovanjem, v katero smer se bo zapletena struktura, kot je ogrodje večje mostovne konstrukcije, skrčila med sintranjem. Postopki CAD/CAM so rezultat neprestano napredujoče tehnologije. V zobozdravstvu zato z nadaljnjim razvojem te tehnologije pričakujemo tudi pomembne izboljšave.

5.4.5 Velikost in zmogljivost rezkalnih enot

Rezkalne enote so na voljo v različnih velikostih – od kompaktnih ordinacijskih enot do večjih laboratorijskih enot in na koncu do velikih samostoječih modelov.

Ordinacijske rezkalne enote: na splošno so najmanj zapletene kompaktne namizne dentalne rezkalne enote, ki so dovolj vsestranske za zobozdravstvene ordinacije, ki lahko rezkajo preproste restavracije in so na voljo z mokrim ali suhim načinom rezkanjem. Običajno imajo tri ali štiri osi in so namenjene za rezkanje majhnih količin preprostejših posameznih restavracij.

Laboratorijske rezkalne enote so običajno petosne in imajo več priročnih funkcij, kot so možnost mokre in suhe obdelave, samodejni menjalniki orodja, dodatni položaji orodja in vretena, ki so trajnejša od tistih, ki se uporabljajo v ordinacijskih rezkalnih enotah. Uporabljajo se za izdelavo tako preprostejših restavracij kot zahtevnejših protetičnih konstrukcij.

Samostoječi modeli rezkalnih enot, ki so namenjeni večjim proizvodnim prostorom, so idealni za večje laboratorije ali rezkalne centre, kjer se proizvodnja CAM izvaja v velikem obsegu. To so vsestranski, zmogljivi in trpežni dentalni rezkalni stroji, ki običajno delujejo s petimi osmi in imajo robotsko avtomatizacijo za izmenjavo blokov materiala. Odlikujejo jih tudi hitrejši čas rezkanja, rezkanje več različnih restavracijskih materialov in možnost izdelave najzahtevnejših protetičnih konstrukcij.

5.4.6 Materiali

Seznam materialov, primernih za obdelavo s subtraktivnimi napravami, je odvisen od posamezne proizvodne tehnologije. Nekatere naprave so posebej načrtovane za izdelavo ogrodij iz cirkonijeve oksidne keramike, medtem ko druge pokrivajo celoten spekter materialov, od akrilata do steklokeramike in keramike visoke trdnosti. Uporabljeni materiali so navedeni v Tabeli 1. Zaradi visoke togosti v končnem sintranem stanju je treba nekatere materiale (npr. cirkonijevo oksidno keramiko) razdeliti v različne skupine ali stopnje sintranja. Uporabljeni materiali, ki se obdelujejo v končnem stanju, so skupine polimerov in kompozitov ter njihove podskupine. Ti materiali v končni fazi se oblikujejo z rezkanjem in zahtevajo površinsko poliranje šele po ločitvi od surovca. Kakovost surovcev je v primerjavi s konvencionalno proizvedenimi mešanici zaradi industrijske izdelave v vedno enakih razmerah izjemna.

5.4.7 Zmožnosti in omejitve subtraktivne metode v zobozdravstvu

Prednosti

Prednosti, povezane s subtraktivno izdelavo, vključujejo dostop do novih, skoraj brezhibnih, industrijsko pripravljenih in kakovostno nadzorovanih materialov ter povečanje kakovosti in ponovljivosti. Poleg tega se stalno izboljšujeta tudi natančnost in učinkovitost.

Slabosti

Potrata surovin in visoka obraba dragih orodij sta najbolj opazni slabosti, povezani s subtraktivno izdelavo. Obdelava plemenitih zlitin je zato po mnenju mnogih ekonomsko neizvedljiva možnost. Aditivne tehnike na splošno veljajo za stroškovno učinkovitejše. Druga pomanjkljivost subtraktivnega pristopa je, da je mogoče izdelati samo oblike, ki so dostopne z orodjem za obdelavo. Na primer notranjih kotov, ki tvorijo kot 180° ali manj, in notranjih odprtin s subtraktivnimi tehnikami ni mogoče izdelati. Drugače povedano, subtraktivni postopek nikoli ne more doseči popolnoma proste oblike.

Ustreznost in možnosti v prihodnosti

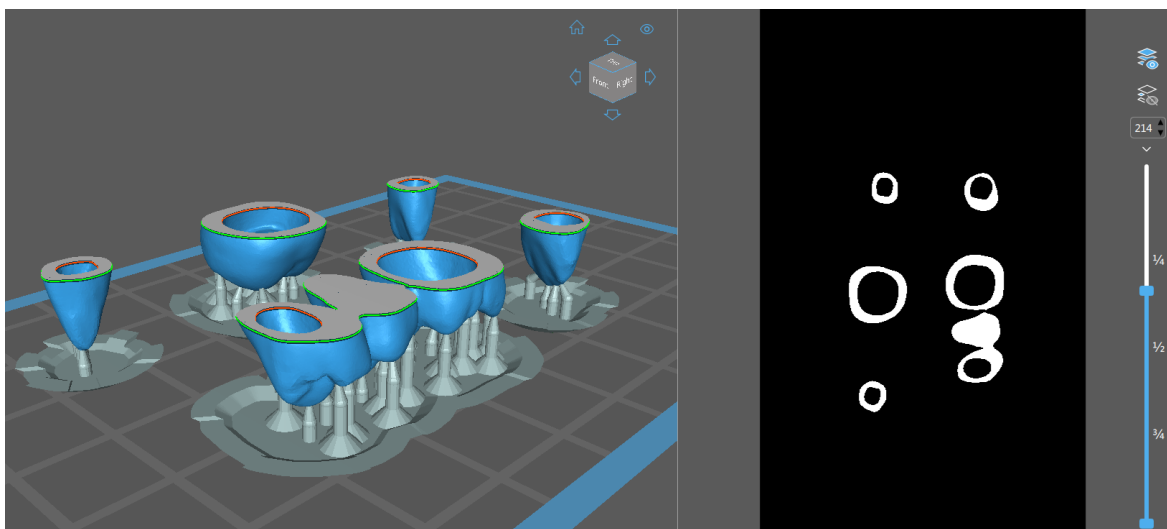
V nasprotju s tehnikami aditivne proizvodnje se zdi, da je nadaljnji razvoj novih subtraktivnih tehnik, ki temeljijo na rezkanju, skoraj izčrpan. Pričakovati je mogoče

napredek in optimizacijo pri času obdelave, obrabi orodij in izboljšanje strategij rezkanja, ki varčujejo z materiali. Ena izmed obetavnih tehnologij je že omenjena rotacijska ultrazvočna obdelava.

5.5 Izdelava z dodajalno tehnologijo

Pri aditivnem pristopu je objekt izdelan s tehnologijo, ki je bila razvita v industriji in je znana tudi kot hitra izdelava prototipov (ang. *Rapid Prototyping – RP*). V primerjavi s tekočim trakom v avtomobilski industriji so pri tej hitri izdelavi dentalni stroji CAM sposobni izdelati individualne izdelke, ki se po obliki povsem razlikujejo od preostalih, in zato v zobozdravstvu težko še govorimo o izdelavi prototipov, saj imajo izdelki običajno tudi že lastnosti končnega izdelka.

Dodajalna izdelava predmetov temelji na datotekah STL, ki opisujejo površino predmeta, sestavljeno iz majhnih trikotnikov. Čeprav tak pristop vodi do relativnih netočnosti pri približevanju natančni obliki, lahko večje število manjših trikotnikov pripomore k natančnejši površini. Za obdelavo formata STL v postopku dodajalne tehnologije je treba matematično razdeliti podatke na plasti v smeri osi z (Slika 62). S to metodo lahko nato posamezne plasti dodajamo drugo na drugo.



Slika 62: Nabor podatkov posameznih razrezanih plasti mostička in prevlek (lastni vir).

V strokovni literaturi lahko za poimenovanje dodajalnih tehnologij najdemo tudi druge izraze: avtomatsko izdelovanje (ang. *Automated Fabrication – AutoFab*), hitra izdelava

orodij (ang. *Rapid Tooling* – RT), izdelava trdnih prostih oblik (ang. *Solid Freeform Fabrication* – SFF), hitro izdelovanje oziroma hitra proizvodnja (ang. *Rapid Manufacturing* – RM), hitra izdelava prototipov (ang. *Rapid Prototyping* – RP).

Številne dodajalne tehnologije so trenutno komercialno dostopne, določene izmed njih pa so bile tudi posebej prilagojene za uporabo v zobozdravstvu. Vse današnje aditivne tehnologije je mogoče razlikovati predvsem po načinu, kako so izdelani sloji, s katerimi se gradi izdelek. Za različne aditivne 3D-tehnologije obstaja veliko imen in definicij. Napačno pa je, da je ta raznolika strojna oprema pogosto poenotena z izrazom »3D-tiskanje«.

5.5.1 Klasifikacija dodajalnih tehnologij

Klasifikacija aditivnih tehnologij je zelo zapletena in se razlikuje od avtorja do avtorja.

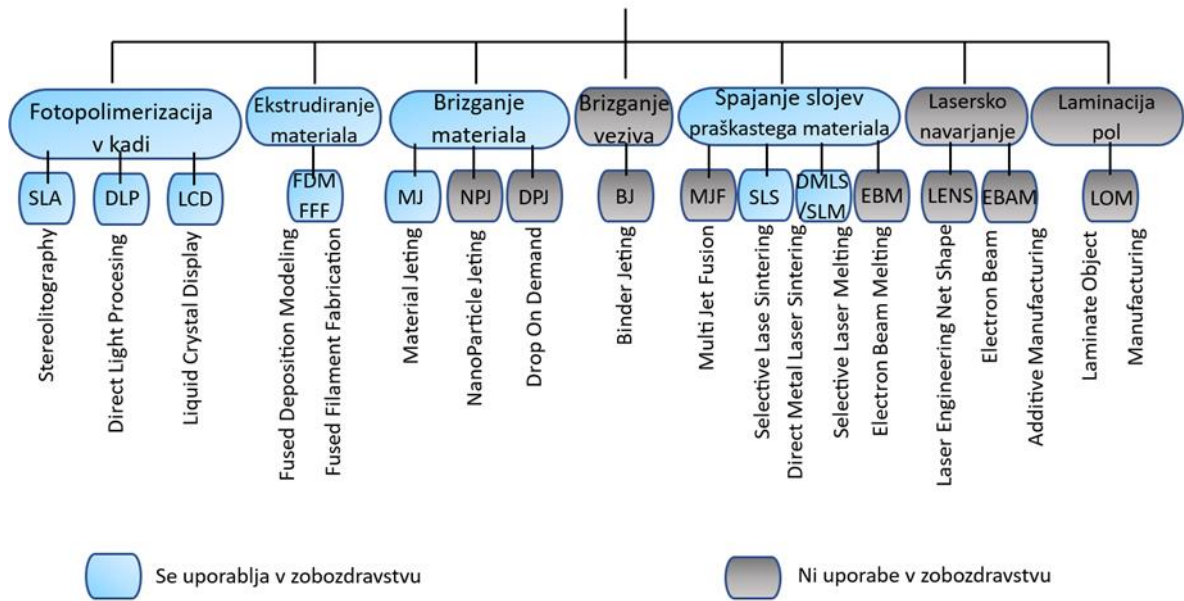
Pionir na področju aditivnih tehnologij v Sloveniji je dr. Igor Drstvenšek s Strojne fakultete v Mariboru, ki razvršča dodajalne postopke glede na način, po katerem se material dodaja v postopek. Tako postopke deli na: selektivno sintranje, selektivno strjevanje, nalaganje krojenih plasti in ciljno nalaganje. Za dodajalne tehnologije ne uporablja izraza 3D-tisk ali tiskanje, temveč izključno izraz slojevite tehnologije.

Tudi drugi inženirji strojništva ločijo postopke ciljnega nalaganja materiala glede na obliko toka osnovnega materiala in način nastajanja 3D-objekta. Ti trije postopki so: neprekinjeno (ang. *material extrusion*), kapljično (ang. *material jetting*) in kapljično-prašno (ang. *binder jetting*).

Praviloma bi se morali izrazi 3D-tisk, 3D-tiskanje in 3D-tiskalnik uporabljati zgolj za podskupino tehnologij ciljnega nalaganja, kot je kapljično nanašanje oziroma brizganje veziva (ang. *binder jetting*).

Tako se pod kratico 3DP (ang. *Three-Dimensional Printing*; trirazsežni tisk) praviloma navajajo zgolj vse patentirane naprave, ki s tiskalnimi glavami za kapljični tisk v praškasti material brizgajo ali kapljično nanašajo vezivo. Drugih dodajalnih tehnologij (Slika 63) zato ne bi smeli imenovati z generičnim imenom 3D-tisk. Slika 67 prikazuje pregled obstoječih kategorij postopkov v aditivni proizvodnji v skladu s standardom EN ISO 17296-2.

DODAJALNE TEHNOLOGIJE



Slika 63: Pregled obstoječih kategorij postopkov aditivne izdelave (lastni vir).

ASTM International je organizacija, ki se ukvarja s poenotenjem terminologije in delitvijo dodajalnih tehnologij. Leta 2012 so postavili standard ASTM F2792-10 (angl. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*), ki vključuje sedem generičnih skupin oziroma dodajalnih proizvodnih postopkov:

- ekstrudiranje materiala (ang. *material extrusion*) – tiskalna glava skozi šobo ekstrudira navadno poltekoči material in gradi predmet v slojih;
- fotopolimerizacija v kadi (ang. *vat photopolymerization*) – osnovni material je tekoči fotopolimer, ki se selektivno utrjuje oziroma polimerizira pod vplivom svetlobnega vira;
- kapljično nanašanje ali brizganje materiala (ang. *material jetting*) – osnovni material je v tekočem stanju in se selektivno kapljično nanaša ali brizga; material je navadno tekoči fotopolimer ali vosek;
- kapljično nanašanje ali brizganje veziva (ang. *binder jetting*) – tekoče vezivo se selektivno nanaša na delce osnovnega praškastega materiala in jih med sabo poveže;
- spajanje slojev praškastega materiala (ang. *powder bed fusion*) – toplotna energija selektivno spaja delce osnovnega praškastega materiala;
- lasersko navarjanje (ang. *direct energy deposition*) – predmet se tiska z usmerjanjem praškastega kovinskega materiala neposredno v laserski snop visoke moči za

odlaganje taljenega materiala (viri toplotne energije so lahko laser, elektronski žarki, plazma itd.);

- laminacija pol (ang. *sheet lamination*) – predmet se gradi z medsebojnim lepljenjem oz. laminiranjem osnovnega materiala v obliki pol.

Aditivne tehnologije se hitro razvijajo in nastajajo nove ter z njimi tudi nova terminologija, zato namerava organizacija ASTM standard posodabljati vsako tretje leto.

S težko nalogo slovenjenja izrazov, povezanih z dodajalnimi tehnologijami, sta se ukvarjala avtorja knjige *3D-tisk*, prof. dr. Tadeja Muck in Igor Križanovskij, po kateri sta uporabljeni klasifikacija in terminologija dodajalnih tehnologij v tem poglavju.

5.5.2 Dodajalne tehnologije v zobozdravstvu

V osemdesetih letih prejšnjega stoletja so že obstajali prvi industrijski stroji za dodajalne proizvodne postopke. Charles Hull (Kolorado, ZDA) je leta 1986 zaprosil za patent prve naprave za stereolitografijo, imenovane SLA (ang. *Stereo-Litographic Apparatus*).

V preteklosti so bile naprave, ki jih pogovorno pogosto imenujemo 3D-tiskalniki, z natančnostjo, primerno za uporabo v zobozdravstvu, na splošno namenjene predvsem industriji ali proizvodnim centrom. V zadnjem času pa so na voljo tudi visokokakovostni tiskalniki, ki so razmeroma ugodni in zobnim laboratorijem omogočajo izdelavo objektov iz fotopolimernega materiala ali kompozita, kot so modeli, opornice, odtisne žlice terčasne prevleke in mostički.

V zobozdravstvu se postopki dodajalne izdelave uporabljajo že dolgo. Eden pomembnih primerov je postopek laserskega sintranja podjetja Bego Medical iz Bremna v Nemčiji. Ko je bila tehnologija novembra 2002 predstavljena, je povzročila senzacijo, saj so strokovnjaki že takrat prepoznali veliko zmožnost tega dodajalnega postopka.

V zobozdravstvu se vse bolj uveljavljajo postopki, ki temeljijo na slojenju, saj se z njimi lahko izdelujejo različne strukture. Ti postopki omogočajo izdelavo dolgoročnih začasnih restavracij, kirurških vodil za vsadke, delovnih modelov, prevlek, navoskov, kovinskih baz za delne proteze in gredi za vsadke. Podobno kot pri izdelavi zobnih nadomestkov z rezkanjem je tudi pri dodajalnih tehnologijah, ki se v zobozdravstvu uporabljajo že od

osemdesetih let prejšnjega stoletja, potrebna programska oprema CAD. S to programsko opremo se oblikujejo modeli in zobni nadomestki (Slika 64) na podlagi digitalnih odtisov in slik, ki se pretvorijo v oblikovalske datoteke in v standardno datoteko STL.



Slika 64: Primeri izdelkov, narejenih z dodajalnimi tehnologijami (lastni vir).

V zobozdravstvu se najpogosteje uporabljajo dodajalne tehnologije, ki so v nadaljevanju tudi opisane:

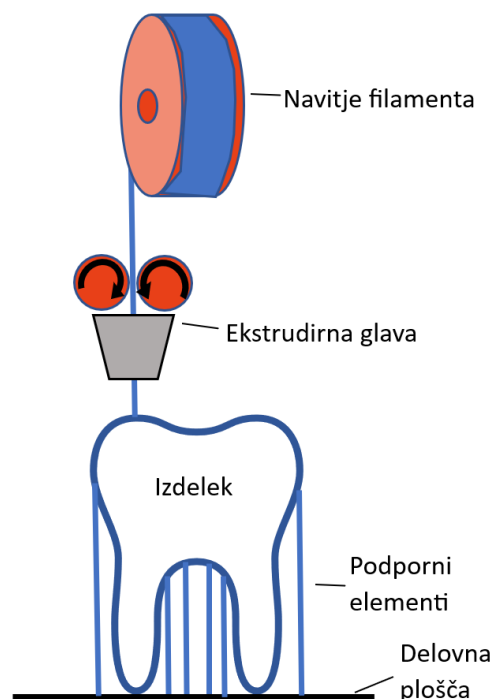
- **ekstrudiranje materiala**
 - **FDM** (modeliranje s spajanjem slojev – ang. *Fused Deposition Modeling*)
 - **FFF** (ekstrudiranje termoplastičnih materialov – ang. *Fused Filament Fabrication*)
- **fotopolimerizacija v kadi**
 - **SLA** (stereolitografija – ang. *Stereolithography*)
 - **DLP** (digitalna obdelava svetlobe – ang. *Digital Light Processing*)
 - **LCD** (tekočekristalni zaslon – ang. *Liquid Crystal Display*)
- **kapljično nanašanje ali brizganje**
 - **MJ** (kapljično nanašanje ali brizganje materiala – ang. *Material Jetting*)
- **spajanje slojev praškastega materiala**
 - **DMLS** (neposredno lasersko sintranje kovine – ang. *Direct Metal Laser Sintering*)
 - **SLS** (selektivno lasersko sintranje – ang. *Selective Laser Sintering*)
 - **SLM** (selektivno lasersko taljenje – ang. *Selective Laser Melting*)

5.5.2.1 Ekstrudiranje materialov

Ekstrudiranje materialov je splošen izraz za vse dodajalne tehnologije, ki z računalniško krmiljeno tiskalno glavo material iztiskajo v slojih za gradnjo objektov. Poleg termoplastov se lahko ekstrudira tudi veliko drugih materialov, kot so kompozitni termoplasti, beton in celo živila.

5.5.2.1.1 Modeliranje s spajanjem slojev (FDM)

Tehnologija modeliranja s spajanjem slojev (ang. *Fused Deposition Modeling* – FDM) uporablja postopek slojenja na osnovi ekstrudiranja materialov, pri katerem se 3D-predmeti gradijo z nanašanjem plasti staljenih termoplastičnih materialov iz računalniško vodene šobe tiskalne glave. Pri tem se uporablja material v obliki filamentov, ki se dovede v ekstrudirno glavo, kjer ob segrevanju postane poltekoč in se tako nanaša na delovno ploščo sloj za slojem, dokler tisk 3D-predmeta ni končan (Slika 65). Za kompleksnejše oblike predmetov je treba uporabiti tisk dodatnih podpornih struktur. Med termoplastičnimi materiali, ki se pogosto uporabljajo, so na primer akrilonitril butadien stiren in polikarbonatni filamenti (ABS, PC, PLA, PA ...).



Slika 65: Shema postopka izdelave z ekstruzijo termoplastov (lastni vir).

Tehnologijo je izumilo podjetje Stratasys ter jo poimenovalo in registriralo kot blagovno znamko FDM. Druga podjetja zato uporabljajo drugačne kratice in imena, kot so FFF, FFM, PJP, MEM, da bi se izognila kršenju pravic intelektualne lastnine, vendar so ti postopki po načinu delovanja in uporabi podobni tehnologiji FDM.

Delno prirejena tehnologija modeliranja taljenega nanosa (FDM) je bila v več raziskovalnih projektih v zobozdravstvu uporabljena kot način za aditivno izdelavo objektov. Kljub nedavnim študijam, ki so pokazale izboljšanje kakovosti površine pri izdelkih FDM, se ta tehnologija zaradi slabše kakovosti končne površine v primerjavi z drugimi tehnologijami v zobozdravstvu ni široko komercialno uporabljala.

5.5.2.1.2 Ekstrudiranje termoplastičnih materialov (FFF)

Pojem FFF (ang. *Fused Filament Fabrication*) se nanaša na tehnologijo ekstrudiranja termoplastičnih materialov, ki jo je poimenovalo združenje RepRap.

V zobozdravstvu se tehnologija ekstrudiranja materialov uporablja za tiskanje modelov za izdelavo prozornih ortodontskih opornic, vendar je treba opozoriti, da so postopki FFF v primerjavi s tehnologijo SLA počasnejši in manj natančni. V zobozdravstvu je tehnologija FFF primerna predvsem za manj zahtevne izdelke.

5.5.2.2 Fotopolimerizacija v kadi

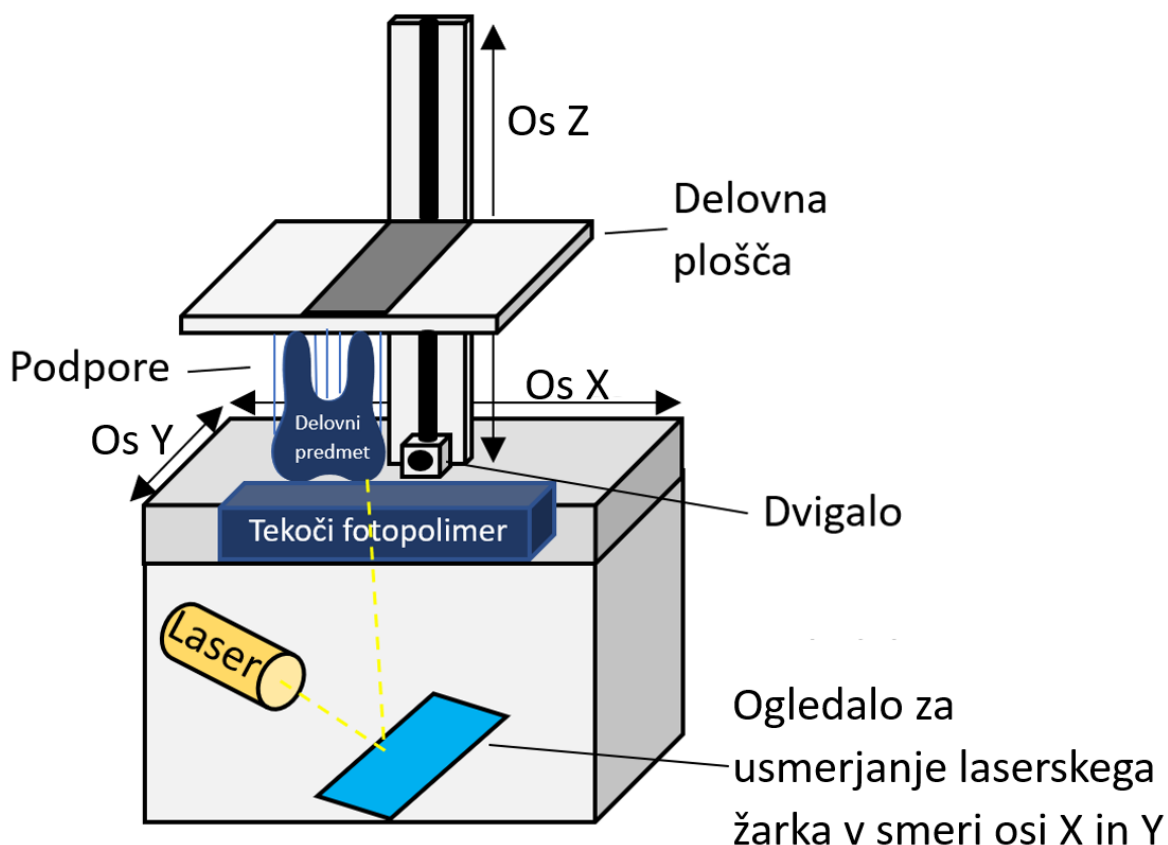
Z izrazom »fotopolimerizacija v kadi« se generično zajemajo vse dodajalne tehnologije, pri katerih se tekoči fotopolimer selektivno utrjuje sloj za slojem pod različnimi svetlobnimi viri. Med tehnologijami, ki temeljijo na fotopolimerizaciji v kadi, so SL, SLA, DLP, LCD in podobne. Te tehnologije so še posebej uporabne v zobozdravstvu, kjer se uporabljajo za izdelavo natančnih delovnih modelov in določenih zobnih nadomestkov. Vsaka tehnologija ima svoje prednosti in omejitve, zato je pomembno izbrati pravo tehnologijo glede na želeni namen.

5.5.2.2.1 Stereolitografija (SL)

Izraz »stereolitografija« (SL) je leta 1986 prvič uporabil Charles W. Hull in ga je opredelil kot aditivni proizvodni postopek za izdelavo 3D-predmetov. Pri tem postopku laserski snop UV-svetlobe izvaja selektivno fotopolimerizacijo po površini kadi s tekočim fotopolimerom in postopoma utrjuje sloj za slojem. Prvo podjetje, ki je komercializiralo to tehnologijo, je 3D Systems s sedežem v Rock Hillu v Južni Karolini v ZDA. Od takrat so se pojavile številne različice te prvotne tehnologije.

Načelo delovanja SL

SL je dodajalni postopek izdelave 3D-predmetov, ki omogoča izdelavo objektov iz datoteke CAD. Postopek temelji na strjevanju tekočega fotopolimera z računalniško vodenim zunanjim virom svetlobe (npr. UV-laserjem). Za izdelavo strukture se uporablja podatke iz digitalnega 3D-zajemanja ali modela CAD, ki se razreže na več slojev določene debeline (Slika 66). Podatki se naložijo v enoto SL in njeno programsko opremo CAM, nato pa se struktura začne izdelovati. Računalniško voden laserski žarek izrisuje prečni prerez vzorca objekta na površini tekočega fotopolimera za vsak sloj posebej. Izpostavljenost ultravijolični laserski svetlobi strdi in utrdi vzorec, ki je narisana na smoli, in ga poveže s spodnjim slojem. Po izrisu se dvižna ploščad spusti za razdaljo, ki je enaka debelini enega sloja pri pristopu »od zgoraj navzdol«, običajno 0,05–0,15 mm. Nato brisalec s fotopolimerom prečisti utrjeni vzorec in ga ponovno prekrije s svežim materialom. Postopek se nadaljuje sloj za slojem, dokler objekt ni izdelan. Drugi stroji uporabljajo modificiran pristop SL »od spodaj navzgor« (Slika 70), pri katerem se delovna platforma potopi v kad s smolo od zgoraj in se med postopkom izdelave dviguje vzdolž osi z. Pristop »od spodaj navzgor« zahteva manj smole, natisnjeni deli imajo manjšo poroznost, natančnost izdelave je visoka in nadzor nad debelino vsake plasti dober. Plasti se povezujejo med sabo in sčasoma tvorijo celoten 3D-objekt, ki ga nato potopimo v kemično kopel, da se očisti odvečne smole. Končno se izdelek utrdi v ustrezni enoti z virom ultravijolične svetlobe.



Slika 66: Shematičen prikaz stroja za stereolitografijo (lastni vir).

Postopek SL zahteva uporabo podpornih struktur, ki služijo za pritrditev predmeta na dvižno delovno ploščad, preprečujejo upogibanje zaradi gravitacije in držijo prečne prereze na mestu, da se upirajo bočnemu pritisku brisalca pri ponovnem nanosu materiala. Podporne strukture so oblikovane ročno ali avtomatsko in izdelane skupaj z izdelkom iz istih materialov. Te podporne strukture je treba odstraniti ročno v ločenem koraku naknadne obdelave. Na splošno SL ni posebej hiter postopek – odvisno od velikosti in števila izdelkov lahko laser za vsako plast potrebuje od ene do nekaj minut.

V napravah za SL so bile pred kratkim predstavljene številne izboljšave. Te vključujejo spremembe, kot je prozorna posoda za tekoči fotopolimer, ki omogoča prehod laserskega žarka skozi posodo. Izboljšavo predstavlja tudi enota za premikanje laserja, ki je nameščena neposredno pod posodo. Te inovacije v primerjavi s konvencionalnimi tehnikami povečujejo fleksibilnost in ekonomičnost celotnega postopka, predvsem z vidika porabe fotopolimera.

Uporaba v zobozdravstvu

Izdelki SL so bili uvedeni v medicino in zobozdravstvo za načrtovanje kirurških posegov ter kot sredstvo za oblikovanje prilagojenih vsadkov. Njihova uporaba se je postopoma razširila in danes se najpogosteje uporabljajo za izdelavo kirurških vodil za vstavitev zobnih vsadkov, odtisnih žlic ter za izdelavo začasnih prevlek, preprostejših zobnih nadomestkov, akrilatnih odlitkov za precizijsko litje, študijskih in delovnih modelov, akrilatnih baz za proteze, okluzijskih opornic ter modelov za uporabo v ortodontiji, ki kažejo obetavno natančnost.

Ta tehnologija vključuje določene značilnosti in omejitve pri materialih, ki so trenutno v uporabi, kar predstavlja slabost pri njeni uporabi. Materiali so predmet lokalnih zakonskih predpisov, zato je od klinične indikacije in medicinske klasifikacije uporabe odvisno, ali je določena tekočina zakonsko odobrena za določeno klinično indikacijo. Trenutno je uporaba te tehnologije omejena na zobne nadomestke in druge izdelke s kratkim časom stika s telesom, kot so kirurška vodila, provizoriji in odtisne žlice.

Materiali s potrebno odobritvijo za dolgotrajno klinično uporabo so trenutno v razvoju in počasi prihajajo na tržišče. Strojna oprema za uporabo te tehnologije je tudi Form 2 (Formlabs, Berlin, Nemčija) (Slika 67), ki se je na tem področju uveljavila kot priljubljena vstopna enota.



Slika 67: Tiskalnik SL Form 2 podjetja Formlabs (lastni vir).

Možnosti in omejitve pri uporabi v zobozdravstvu

Postopek SL ima številne prednosti, med katerimi izstopajo izjemno visoka natančnost izdelave, gladka površina, izjemna izdelava podrobnosti in visoka mehanska trdnost. Poleg tega se lahko s preglednostjo izdelanih modelov in nedavnim razvojem barvnih fotopolimerov anatomske strukture tudi barvno prikaže.

Vir UV-svetlobe pri osnovni napravi SLA je laser. To omogoča izdelavo predmetov skoraj neomejene velikosti, pri čemer ni izgube kakovosti tiska, kar je značilno za tiskalnike s tem vir svetlobe. Ta naprava ima širok razpon valovne dolžine svetlobnega vira, ki omogoča delo z različnimi materiali vse od 356 pa do 456 nanometrov. Pri omenjenem spektru svetlobe ni omejitve pri razdalji med virom svetlobe in delovno površino.

Postopek pa ima tudi nekaj slabosti, kot so visoki stroški opreme in materiala, ravnanje s tekočim materialom in ročna naknadna obdelava, kar lahko vodi do deformacije izdelka. Pomanjkljivost teh naprav je tudi počasnost, saj postopek temelji na gradnji sloja za slojem z enim zgoščenim laserskim žarkom, kar poteka počasi pri izdelavi več objektov na ploščadi.

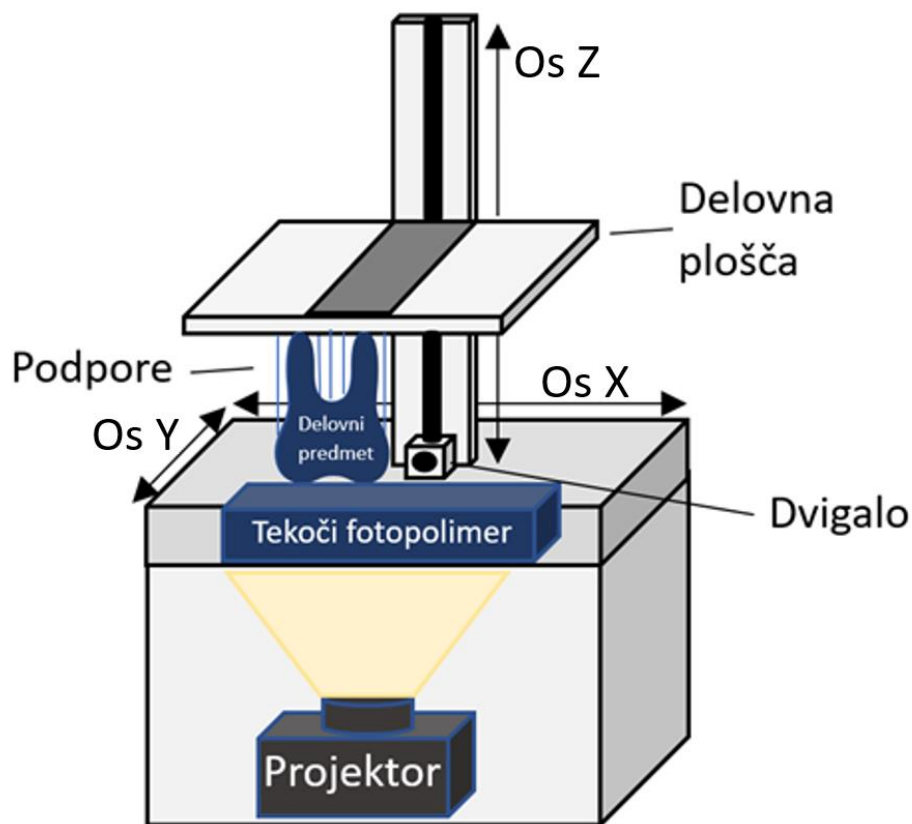
5.5.2.2 Projekcija DLP

Projekcija DLP (ang. *Digital Light Processing*) je metoda dodajanja materiala, ki temelji na fotopolimerizaciji v kadi, pri čemer se za utrjevanje fotopolimera namesto UV-laserja uporablja projektor DLP. Ta projektor omogoča sočasno utrjevanje celotnega sloja, kar pospeši aditivni postopek za izdelavo zobnih nadomestkov.

Načelo delovanja DLP

Pri tehnologiji DLP se s programsko opremo CAM podatki o volumnu objekta pretvorijo v bitno sliko, ki nadzoruje projektor. Projektor UV-svetlobo projicira skozi zaslonsko masko iz podnožja stroja čez ogledalo. Projicirana silhueta posamezne plasti, ki temelji na podatkih o volumetričnih pikslah oz. vokslih, utrjuje fotopolimer skozi prozorno dno kadi (Slika 68). Delovna ploščad je v tekočini blizu prozornega dna, kjer se prva utrjena plast drži delovne ploščadi in se premika navzgor po vsakem osvetljevanju. Tekočina se nato zlije v prostor med dnom in predhodno strjeno plastjo, kjer se izpostavi naslednji svetlobni projekciji. Ta

postopek se ponavlja, dokler predmet ne zraste plast za plastjo, najprej z nosilno in nato s ciljno konstrukcijo. Več predmetov lahko hkrati raste glede na velikost enote.



Slika 68: Shematičen prikaz postopka digitalne obdelave svetlobe (DLP) (lastni vir).

Kot pri vseh tehnikah izdelave na osnovi fotopolimerizacije v kadi izdelavi predmeta v enoti CAM sledi več naknadnih postopkov. Poleg čiščenja in odstranjevanja podpornih struktur je obvezen tudi postopek naknadnega strjevanja s svetlobo, ki je nujen zaradi končnih fizikalnih in mehanskih lastnosti materiala. Za nadzor kakovosti končnega izdelka je pomembno, da vir svetlobe in čas strjevanja ustrezata priporočilom proizvajalca.

Uporaba in materiali v zobozdravstvu

Tehnologija DLP zahteva pravilno prilagojeno tekočino materiala za vsak stroj in indikacijo, zaradi česar je pomembno natančno prilagajanje med strojem in materialom. V zobozdravstvu je specialist za fotopolimere Delta Med (Friedberg, Nemčija) že leta 2008 razvil polnjeni kompozitni fotopolimer, ki je opremljen z barvnimi odtenki zob. To omogoča izdelavo začasnih zobnih nadomestkov. Svetlobno polimerizirajoči mikrohibridni polnilni material (E-Dent 100, EnvisionTec, ZDA) z ustreznimi mehanskimi in estetskimi lastnostmi

se uporablja tudi za izdelavo tričlenskih začasnih mostičkov. V zadnjih letih so bile enote DLP prilagojene za izdelavo kirurških vodil za namestitvev zobnih vsadkov, delovne modele, odtisne žlice, začasne prevleke in modele za ortodontijo.

Možnosti in omejitve pri uporabi v zobozdravstvu

Tehnologija DLP se lahko v kombinaciji s kompozitnim polimerom uporablja za različne diagnostične namene, načrtovanje zdravljenja ter izdelavo provizorijev in delovnih modelov. Pomembna prednost je nizka poraba materiala v primerjavi z bloki, ki se uporabljajo pri subtraktivni obdelavi. Možnost izdelave z večplastnimi materiali predstavlja velik potencial za DLP, vendar pa se ta tehnologija trenutno najpogosteje uporablja za izdelavo delovnih modelov. Tudi tu je potrebna naknadna obdelava izdelkov, pri čemer se zaradi izdelave na tekoči osnovi čiščenje izvaja v posebnih alkoholnih kopelih in z ultrazvočno opremo. V tem postopku je pomembno pravilno odstranjevanje odpadkov nepolimeriziranega polimera.

5.5.2.2.3 Tehnologija tekočerkristalnih zaslonov (LCD)

Tekočerkristalni zasloni (LCD) so zasloni, ki za prikazovanje slike uporabljajo tekoče kristale. Zaradi njihove kompleksne strukture lahko prikazujejo tako preproste kot kompleksne vzorce. Tekoči kristali sami ne oddajajo svetlobe, ampak jo zgolj modulirajo, zato je pri zaslonih LCD potrebna primerna osvetlitev. Za ustrezno osvetlitev se v dodajalni tehnologiji SL z zasloni LCD običajno uporabljajo UV-sijalke ali LED-svetila, ki zagotavljajo primeren spekter svetlobe za utrjevanje fotopolimerov v kadi nad zaslonom (Slika 69). UV-svetloba skozi zaslon LCD osvetljuje sloj za slojem, podobno kot tehnologija DLP.

Med pomembnimi specifikacijami naprav, ki uporabljajo to tehnologijo, je gostota pikslov (ang. *Pixel Per Inch* – PPI), ki bistveno vpliva na kakovost natisnjene objekta. Večji je zaslon, manjša je gostota in večjo ločljivost potrebuje naprava. Na primer, ločljivost 4 K (4096 x 2160 pikslov) na 6-palčnem zaslonu zagotavlja natančnost 35 mikronov po oseh x in y.

Pomembna specifikacija je tudi razdalja med zaslonom in delovno površino – manjša je razdalja, natančnejši bo izdelek. Med zaslonom in tekočim polimerom pa mora biti vedno nekaj slojev zaščite, zato je določena razdalja vedno prisotna.



Slika 69: UV-osvetlitev čez zaslon LCD pod kadjo za fotopolimer (lastni vir).

Prednosti in pomanjkljivosti tehnologije LCD

Prednost teh naprav je, da so cenovno najbolj dostopne. Ta tehnologija trenutno pokriva skoraj 80 % celotnega trga tiskalnikov SLA.

Spekter UV-svetlobe je odvisen od LED-svetil, vgrajenih v napravo. UV-svetloba, ki prehaja skozi zaslon LCD, lahko poškoduje organske dele zaslona in jih sčasoma uniči. Zaslone LCD se zato štejejo za potrošni material.

5.5.2.3 Kapljično nanašanje ali brizganje

Kapljično nanašanje ali brizganje materiala je generično poimenovanje za dodatne tehnologije tako imenovanega 3D-tiska, ki gradijo predmete z nanašanjem materiala iz tiskalne glave. Osnovni materiali, ki se uporabljajo v večini primerov, so fotopolimeri, ki se ob kapljičnem nanašanju takoj utrjujejo z UV-sijalkami. Ta tehnologija je znana tudi pod imeni PolyJet, PolyJet Matrix, multijet printing (MJP) in multijet modeling (MJM).

5.5.2.3.1 Tehnologija PolyJet

Izraelsko podjetje Objet Geometries je leta 1998 ustanovila trojica partnerjev, Rami Bonen, Gershon Miller in Hanan Gotaiit, ter razvila tehnologijo PolyJet. Leta 2012 se je združilo s podjetjem Stratasys, ki je eden od vodilnih proizvajalcev 3D-tiskalnikov na svetu za industrijsko in komercialno uporabo ter za osebno izdelavo. Objet Geometries je bilo prvo

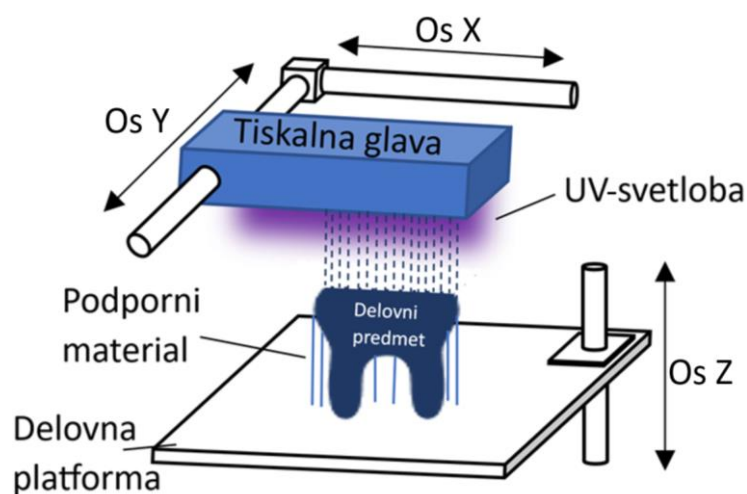
podjetje, ki mu je uspelo kapljično nanašati fotopolimerni material in razviti visokofunkcionalno tehnologijo. Tehnologija PolyJet, ki je bila predstavljena leta 2000, omogoča sočasno izdelavo 3D-predmetov z različnimi fotopolimernimi materiali.

Tehnologija PolyJet deluje kot neposredni postopek tiskanja, podobno kot običajni kapljični tisk, le da se namesto tiskarske barve oziroma črnila uporablja tekoči fotopolimer, ki se točkovno nanaša in utrjuje z UV-sijalkami.

Načelo delovanja

Med bistvenimi komponentami sistema PolyJet (Slika 70) so: delovna platforma, ki se premika v smeri z, osnovna plošča, na katero je postavljen delovni 3D-predmet, tiskalne glave PolyJet s 1536 šobami in UV-sijalkami, kartuše s tekočim fotopolimerom za izgradnjo 3D-predmeta in materialom za izdelovanje podpor ter sistem za izravnavo vsakega posameznega sloja.

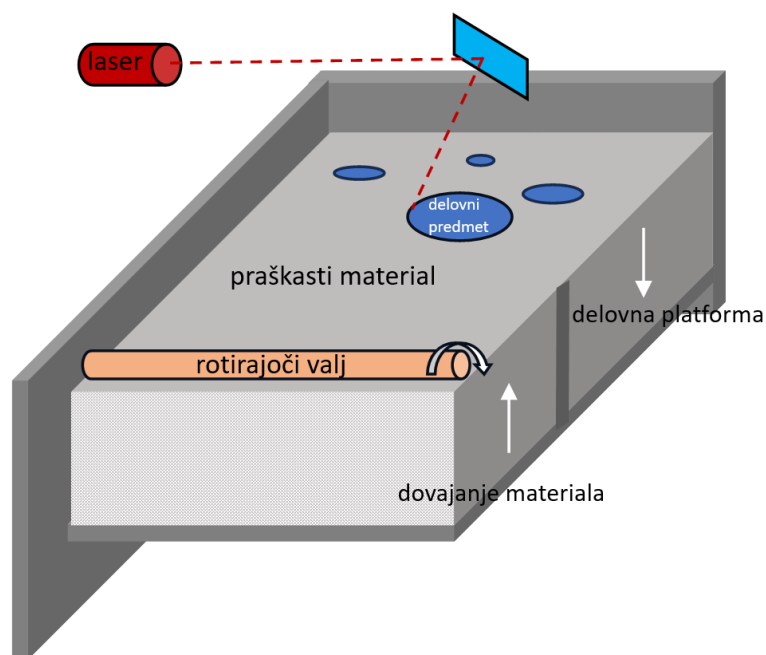
Pri gradnji kompleksnejših predmetov s previsnimi strukturami se sočasno tiska podporni material, ki se nanese na enak način kot osnovni material – z brizganjem oziroma kapljičnim nanašanjem. Tiskalna glava nanese trenutni sloj, ki se takoj fotopolimerizira pod vplivom UV-svetlobe, ki jo dovajata ena ali dve sijalki, nameščeni ob straneh tiskalne glave. Nato se delovna plošča oziroma platforma spusti za debelino sloja navzdol in tiskalna glava nanese naslednji sloj. Tako se doseže gladka površina sloja z debelino 16 mikronov, zato ni potrebe po nadaljnji obdelavi predmeta pred uporabo. Po končani izdelavi se vodotopni podporni material odstrani z vodnim curkom.



Slika 70: Shematičen prikaz delovanja tehnologije PolyJet (lastni vir).

5.5.3 Spajanje slojev praškastega materiala

Tehnologije, ki se ukvarjajo s selektivnim spajanjem praškastega materiala s toplotnim virom, kot je laserska svetloba, spadajo v skupino metod spajanja slojev praškastega materiala (ang. *Powder Bed Fusion – PBF*). Med temi tehnologijami je najbolj znana tehnologija selektivnega laserskega sintranja (SLS) ali krajše laserskega sintranja (ang. *Laser Sintering – LS*), ki je bila razvita sredi 80-ih let prejšnjega stoletja na Univerzi v Teksasu pod vodstvom Carla R. Dekarda in patentirana leta 1989. Postopek deluje tako, da se praškasti material selektivno spaja s toplotno energijo, ki jo oddaja laserski vir. Na Sliki 71 je prikazan splošni način delovanja te tehnologije.



Slika 71: Splošna shema delovanja tehnologij, ki temeljijo na spajanju slojev praškastega materiala (lastni vir).

5.5.3.1.1 Selektivno lasersko sintranje (SLS)

Pri tehnologiji, ki jo imenujemo selektivno lasersko sintranje (SLS), se uporablja laserski vir za selektivno spajanje ali sintranje slojev praškastega materiala oz. prahu. Ta tehnologija omogoča uporabo številnih različnih materialov, predvsem polimernih, kot so poliamid (najlon), steklo-poliamidni kompoziti, poliamid z negorljivimi dodatki in drugi. Pogosto se uporabljajo tudi dvokomponentni materiali, na primer steklo ali kovina, pri katerih so prašni delci predhodno prevlečeni z materialom, ki ima nižjo točko tališča. V zadnjem času se

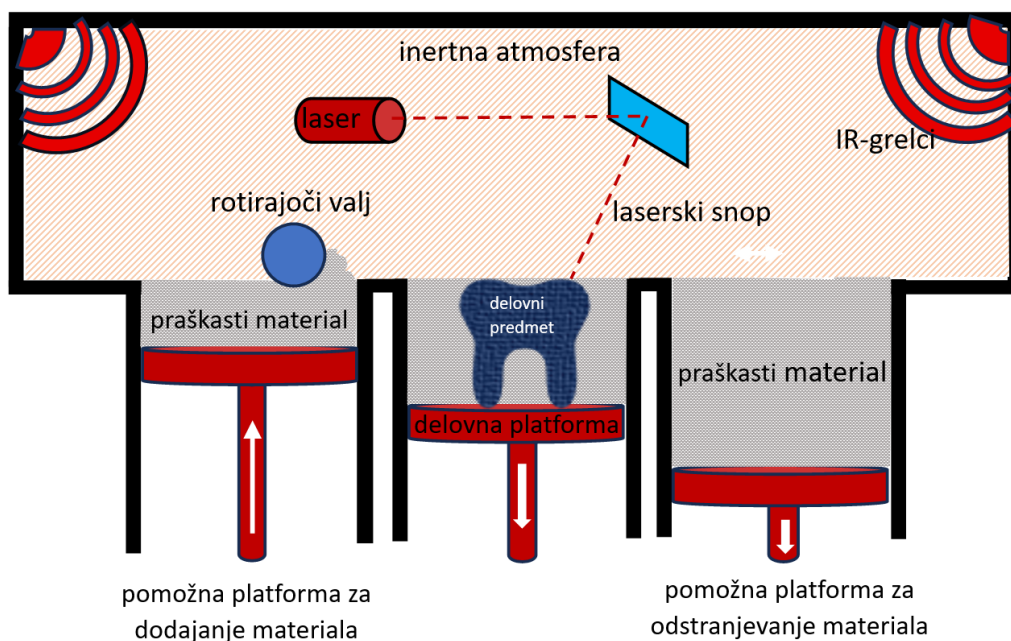
pogosto uporablja tudi material aluminid, ki je praškast material na osnovi polimera in vključuje delce aluminija. S tem materialom je mogoče pri nizkih temperaturah izdelati predmete s kovinskim leskom. Selektivno lasersko sintranje (SLS) je izjemno natančna tehnologija, ki omogoča izdelavo končnih izdelkov visoke kakovosti iz številnih materialov.

Pri uporabi kovinskega prahu (npr. aluminija, jekla ali titana) se za spajanje delcev uporablja močnejši temperaturni vir, običajno pulzni laserji. Ti ne omogočajo samo sintranja, ampak tudi taljenje kovinskega materiala in s tem neposredno izdelavo kovinskih končnih izdelkov. Take modifikacije tehnologije SLS so komercialno na voljo pod različnimi imeni in kraticami, kot so SLM, DMLS in Laser-Cusing.

Kakovost površine predmetov, natisnjenih s SLS oz. SLM, je zelo visoka. Včasih se uporablja tudi naknadna obdelava s površinskim poliranjem, da se doseže visok površinski sijaj. Tehnologije, ki temeljijo na spajanju slojev praškastega materiala, spadajo v skupino dodajalnih tehnologij, krajše PBF (ang. *Powder Bed Fusion*), ki je ena izmed sedmih generičnih skupin po razvrstitvi ASTM. SLS je bila razvita prva in je osnovna tehnologija te skupine, obstaja pa tudi vrsta drugih tehnologij, ki so modifikacije osnovne.

Delovanje

Sistem tehnologije SLS vključuje delovno in pomožno platformo s posteljo za tiskanje in dodajanje materiala, sistem za nanos materiala ter pomožno platformo s posteljo za odstranjevanje odvečnega materiala. Sistem ima tudi računalniško voden optični sistem z laserjem za natančno sintranje v slojih. Delci osnovnega praškastega materiala so navadno veliki od 50 do 100 μm , v nekaterih posebnih postopkih pa so lahko tudi manjši od 10 μm . Material se nanaša v slojih, po nanosu vsakega posameznega sloja pa računalniško vodeni laser opiše trenutni prečni rez predmeta, kar omogoča, da se delci prahu med sabo spajajo oziroma sintrajo. Ko je prah izpostavljen laserskemu snopu z močjo do 250 W, se temperatura materiala dvigne nad temperaturo kristalizacije, kar omogoča, da se delci materiala spojijo in nastane sloj delovnega predmeta. Postopek se ponavlja za vsak sloj, ki se nanese na posteljo. Celoten postopek se izvaja v komori z inertno atmosfero z dodatkom dušika in minimalnim deležem kisika (od 0,1 do 3 %), kar zmanjša tveganje eksplozije in oksidacije površinskega sloja prahu. Slika 72 prikazuje shemo delovanja tehnologije SLS, ki uporablja pomožno platformo za dodajanje in odstranjevanje materiala.



Slika 72: Shema delovanja tehnologije SLS (lastni vir).

Temperatura praškastega materiala v postelji na delovni platformi se vzdržuje nekoliko pod temperaturo tališča. Infrardeči (IR) grelci so nameščeni nad delovno platformo, da ohranjajo povišano temperaturo okoli delovnega predmeta. V nekaterih primerih se delovna platforma ali postelja ogreva z uporavnimi grelci. Predgrevanje materiala je nujno, da je potrebna energija laserja nižja, obenem pa so notranje napetosti v tiskanem predmetu manjše, kar zmanjšuje možnosti za deformacije, predvsem krčenje materiala in s tem predmeta. Ko je prvi sloj oblikovan in predgret, se fokusirani laserski snop usmeri na površino sloja, nato se premika z galvanometri tako, da opiše in sintra steno predmeta v posameznem sloju.

Odvečni prah deluje kot podpora pri tiskanju predmeta. Potem se delovna platforma spusti za višino sloja in na posteljo platforme se nanese nov sloj materiala, katerega površino poravnava rotirajoči valj. Ponovi se sintranje z računalniško vodenim laserskim snopom. Postopek se ponavlja, dokler predmet ni natisnjen. Po končanem tiskanju je treba predmet pustiti v postelji, prekrit s prahom, dokler se temperatura ne zniža do vrednosti, ko ga lahko izpostavimo sobni temperaturi. Čas ohlajanja je seveda odvisen od dimenzij 3D-predmeta in od vrste materiala ter lahko traja tudi nekaj ur. Če predmet odstranimo prehitro, lahko pride do degradacije materiala zaradi vpliva kisika, poleg tega se predmet lahko deformira zaradi notranjih napetosti, ki nastanejo kot posledica prevelike temperaturne razlike. Na koncu se odstrani odvečni material in predmet se lahko po potrebi dodatno obdela.

Ključno je, da ima prah, uporabljen v tehnologiji SLS, ustrezno sipkost, kar omogoča enakomeren nanos posameznega sloja. Če so delci okrogle oblike, je sipkost večja, težava pa lahko nastane, če so delci premajhni, saj se poveča trenje med delci, kar povzroči elektrostatične sile in zmanjšanje sipkosti. Sistem za nanos praškastega materiala mora omogočiti natančen nanos določenega volumna s pomožne na delovno platformo. Prav tako je ključno, da se tisk izvaja v inertni dušikovi atmosferi z minimalnim deležem kisika, da se prepreči povečanje površinske energije in reaktivnost materiala, ki lahko ob prisotnosti kisika povzročita eksplozivnost.

Poleg tega mora sistem za nanos prahu zagotoviti minimalno prašenje, saj lahko prašenje povzroči kontaminacijo optičnih elementov, zamike laserskega snopa in celo poškodbe gibljivih delov stroja.

Prednosti in pomanjkljivosti SLS

Tehnologija SLS ima številne prednosti, kot so hitrost postopka, visoka natančnost, velika izbira materialov, možnost izdelave brez podpornega materiala, trajnost končnega izdelka ter možnost izdelave prototipov in končnih izdelkov.

Obstajajo pa tudi nekatere pomanjkljivosti tehnologije SLS, kot je potreba po inertni atmosferi, zaradi česar morajo biti stroji večjih dimenzij. Poleg tega je poraba energije za sintranje lahko zelo velika – do 300- do 500-krat večja kot pri tehnologiji SLA. Za izdelavo končnih izdelkov pa pogosto potrebujemo dodatno infiltracijo.

Dodatna infiltracija je postopek, pri katerem se končni izdelek po SLS potopi ali obdela z dodatno snovjo (npr. umetno smolo), ki jo absorbira. Ta dodatna snov zapolni odprte pore in okrepi trdnost končnega izdelka, kar poveča njegovo obstojnost in končno kakovost. To je običajen postopek, ki sledi SLS za doseg trdnejših končnih izdelkov z boljšimi estetskimi lastnostmi.

5.5.3.1.2 Neposredno lasersko sintranje kovine (DMLS)

Neposredno lasersko sintranje kovine (ang. *Direct Metal Laser Sintering* – DMLS) je postopek dodajalne tehnologije, ki temelji na združevanju slojev kovinskega prahu z laserskim žarkom. Za izdelavo predmeta se uporabljata selektivno segrevanje in združevanje

zaporednih slojev praškastega kovinskega materiala. Običajno se uporabljajo materiali, kot so aluminij, železo, titan, jeklo, zlitine niklja, kobalt-krom in podobno. Podjetje EOS je tehnologijo poimenovalo DMLS in ime registriralo kot svojo blagovno znamko. V primerjavi s SLM ta postopek segreva kovinski prah na temperaturo, pri kateri se delci med sabo združijo, ne da bi se material v celoti stopil. Rezultat je trdnejša, vendar manj homogena struktura.

5.5.3.1.3 Popolno taljenje (FM)

Tehnologija popolnega taljenja (ang. *Full Melting* – FM) spada v skupino tehnologij, ki temeljijo na spajanju prahu in se uporablja za obdelavo inženirskih zlitin in delnokristaliničnih polimerov. Ta postopek vključuje izpostavljanje celotnega območja materiala visoki laserski energiji, ki omogoča staljenje delcev do globine, ki presega debelino sloja. Termična energija je dovolj visoka, da se ob nanosu novega sloja stopi tudi površina predhodno nanesenega sloja. Ta postopek se učinkovito uporablja za izdelavo predmetov s trdnimi strukturami in visoko gostoto izdelka (tudi do 99,9 %), pri čemer se najpogosteje uporablja poliamid ali najlon, med kovinskimi praškastimi materiali pa so najpogostejši titan, nerjavno jeklo, kobalt in krom.

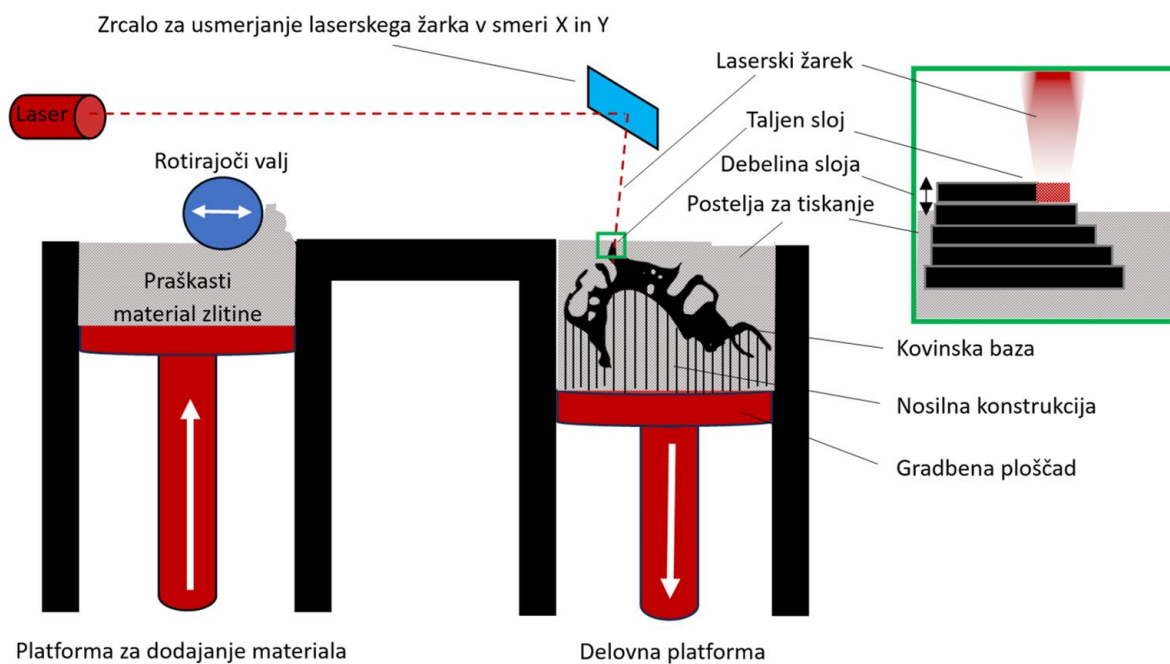
Postopek taljenja se pogosto uporablja za izdelavo končnih izdelkov brez potrebe po naknadni obdelavi. Ta tehnologija je znana tudi pod izrazi selektivno lasersko taljenje ali nataljevanje (SLM), če se uporablja kovinski prah, pa se uporabljajo tudi izrazi LaserCusing in taljenje z elektronskim snopom (ang. *Electron Beam additive Manufacturing* – EBM).

5.5.3.1.4 Selektivno lasersko taljenje (SLM)

Selektivno lasersko taljenje (ang. *Selective Laser Melting* – SLM), tudi znano kot nataljevanje, spada v kategorijo tehnologij spajanja kovinskega prahu. (ang. *Powder Bed Fusion* – PBF). Laser visoke moči se uporablja za selektivno taljenje kovinskega prahu, kar omogoča izdelavo končnih kovinskih izdelkov.

Načelo delovanja SLM

Pri tehnologiji SLM se uporablja podobno načelo delovanja kot pri strjevanju fotopolimerov SL. Najprej se na delovno platformo nanese tanka plast prahu, nato se z laserjem selektivno stopi zlitina, kar pomeni, da se objekt plast za plastjo gradi (Slika 73). Valjček razporedi praškasti material po površini delovne platforme, pri čemer se postopek nanašanja plasti ponavlja, dokler ni izdelan celoten objekt. Po končanem postopku gradnje se izvede nekaj naknadne obdelave, na primer odstranitev nosilne konstrukcije z objekta. Pri uporabi zlitin je potreben poseben postopek naknadnega segrevanja (kaljenja) za sprostitve napetosti v celotni konstrukciji.



Slika 73: Shematičen prikaz postopka izdelave kovinske baze delne proteze v proizvodni enoti SLM (lastni vir).

Uporaba SLS oz. SLM v zobozdravstvu

Velika prednost naprave SLS oz. SLM je raznolikost termoplastičnih materialov, ki jih je mogoče uporabiti, kot so najlonski kompoziti, dentalne zlitine, termoplastični kompoziti, v zadnjem času pa tudi keramika. Ta razpon materialov je še posebej koristen v zobozdravstvu,

saj omogoča izdelavo ogrodij delnih protez, ogrodij za prevleke in druge zobne nadomestke ter pripomočke za obravnavo zobnih in čeljustnih nepravilnosti.

Uporaba naprave SLS oz. SLM za izgradnjo ogrodij za zobne nadomestke se izkazuje kot metoda, konkurenčna rezkani obdelavi trdnih blokov, saj zagotavlja uporabo zlitin in drugih materialov »brez izgub«.

5.5.4 Povzetek

Aplikacije dodajalne tehnologije s fotopolimeri v zobozdravstvu

V zobozdravstvu se dodajalna tehnologija s fotopolimeri uporablja za izdelavo modelov za opornice, delovne modele in voščene modelacije kovinskih struktur za precizijsko litje. Eden od primerov uporabe te dodajalne tehnologije v zobozdravstvu je izdelava kirurških vodil za zobne vsadke, medtem ko se je nedavno pojavila tudi uporaba 3D-tiskanih materialov za začasno oskrbo. Čeprav so tiskani izdelki obetavni v smislu natančnosti, pa je trenutna omejitev še vedno sestava materialov, primernih za dolgotrajno uporabo.

Možnosti in omejitve pri uporabi v zobozdravstvu

Dodajalna tehnologija s fotopolimeri lahko izdelava zapletene oblike. V primerjavi s subtraktivnimi tehnologijami ne zahteva posebnih strategij ali uporabe posebnih parametrov za kompenzacijo velikosti rezkalnega orodja. Predmet je mogoče reproducirati in izdelati z natančnimi podrobnostmi, saj so lahko posamezne izdelane plasti tanke 20 mikronov ali manj. Izjemna površina izdelkov kaže večje anatomske podrobnosti, kar je odlična prednost pri izdelavi začasnih prevlek v sprednjem (vidnem) predelu zobnega loka. Dodajalna tehnologija reproducira predmet, ki ga želimo natisniti, z minimalnimi odpadki. Krivulje, luknje in zapletenejše oblike se hitreje, lažje in natančneje izdelajo z dodajalno tehnologijo kot pa z odzematnimi tehnologijami. Delovne modele, IDM in začasne prevleke je mogoče natisniti z isto napravo. Trirazsežni tiskalniki zasedejo dokaj majhno površino, zaradi česar so idealni za montažo v laboratoriju.

Ena od glavnih pomanjkljivosti dodajalne tehnologije je prisotnost podpornih struktur, ki so bistvenega pomena za izdelavo votlih delov in previsnih mest v prevlekah in drugih zobnih nadomestkih. Prisotnost podpornih struktur zahteva naknadno obdelavo za odstranitev.

Pomanjkljivosti sta tudi zmanjšana trdnost modela in notranja napetost zaradi različnih lastnosti materiala. Učna krivulja načrtovanja zobnih nadomestkov z uporabo CAD je dokaj zahtevna.

Ustreznost in možnosti »3D-tiskanja« v prihodnosti

Na zobozdravstvenem področju je tehnologija kapljičnega nanašanja ali brizganja še vedno v začetni fazi razvoja in še ni izkoristila vseh svojih možnosti. Eden izmed izzivov je izdelava 3D-objektov iz več različnih materialov, ki reproducirajo individualni svetlobni odboj naravnega zoba. Treba je spremeniti strojno opremo in uporabljene materiale ter prilagoditi programsko opremo za zagotavljanje ustreznega jedra dentina z različicami, ki izboljšujejo večplastno obliko zoba.

Zanimiva raziskovalna smer je aditivno pridobivanje keramike visoke trdnosti, kot sta Al_2O_3 ali ZrO_2 , za kar se uporablja tehnologija ekstruzije koloidnih past za pridobivanje struktur zapletenih oblik. Homogenost in trdnost končnih struktur sta pomanjkljivosti te tehnologije, ki še vedno nista v celoti pojasnjeni.

Možnosti in omejitve SLS oz. SLM pri uporabi v zobozdravstvu

Prednosti

Tehnologija SLS oz. SLM ima številne prednosti, med katerimi sta visoka natančnost in raznovrstnost materialov. Z uporabo sistema SLS oz. SLM je mogoče pridobiti zelo majhne dele objekta, velikosti le 0,5 mm, kar pa ne vpliva na hitrost izdelave, saj je mogoče predgretje strojev tik pod temperaturo, ki omogoča taljenje kovinskega prahu z laserjem.

Slabosti

Kljub vsem prednostim ima ta tehnologija tudi nekaj slabosti, med katerimi so visoki stroški opreme, možnost deformacij izdelka in možnost hrapave površine. Končni izdelek po postopku SLS je lahko hrapav in ima odprte pore, kar otežuje poliranje izdelka do visokega sijaja.

Ustreznost in možnosti aditivnih proizvodnih tehnologij, ki temeljijo na laserju, v prihodnosti

Pričakujemo velik napredek na različnih področjih aditivnih tehnologij, in sicer pri razvoju materialov, programske opreme in postopkov, ki bodo izboljšali hitrost in natančnost izdelave objektov. V prihodnosti bodo stroški vzdrževanja in servisiranja opreme v centrih za dodajalne tehnologije na osnovi laserja nižji, kar bo zmanjšalo skupne stroške in povečalo hitrost izdelave. Tudi širitev nabora materialov in možnost daljšega skladiščenja materialov bosta prispevala k stroškovni učinkovitosti. Pri uporabi v zobozdravstvu je treba izboljšati neželen pojav popačenje materialov, da bi dosegli izdelke z večjo natančnostjo pasivnega prileganja, zlasti npr. pri vijachenih nadgradnjah na zobnih vsadkih.

Nove proizvodne tehnike zahtevajo nadaljnje laboratorijske raziskave in klinično testiranje, da se zagotovi kakovost izdelanih zobnih nadomestkov. Zobni nadomestki, izdelani s tehnologijami CAD/CAM, subtraktivnimi ali aditivnimi postopki, morajo izpolnjevati zahteve po posebnih fizikalnih, mehanskih, biokompatibilnih in estetskih lastnostih.

Vprašanja:

- Naštej in opiši proizvodne koncepte računalniško podprte izdelave v zobozdravstvu.
- Katere metode računalniško podprte izdelave obstajajo?
- Opiši vrste obdelave subtraktivne tehnologije v zobozdravstvu.
- Po katerih dejavnikih se razlikujejo dentalne rezkalne enote?
- Koliko in katere osi v koordinatnem sistemu uporabljajo rezkalne enote?
- Katere so prednosti triosnih in katere petosnih naprav?
- Katere so prednosti suhe obdelave?
- Kateri materiali zahtevajo mokro obdelavo in zakaj?
- Opiši glavno merilo za ocenjevanje izdelka CAM.
- Katere so slabosti subtraktivne tehnologije?
- Naštej in opiši dodajalne proizvodne postopke.
- Katere so prednosti in pomanjkljivosti dodajalne tehnologije?

6 MATERIALI CAD/CAM

UČNI CILJI

Ob koncu tega poglavja mora bralec:

- znati prepoznati razpoložljive materiale za izdelavo CAD/CAM,
- razumeti sestavo materialov za izdelavo CAD/CAM,
- znati ugotoviti, katere materiale je mogoče uporabiti za različne vrste proizvodnih postopkov CAD/CAM (npr. rezkanje ali 3D-tiskanje).

Uvod

V zobozdravstvu se postopki subtraktivne in aditivne tehnologije za izdelavo protetičnih restavracij vse bolj uveljavljajo v klinični in laboratorijski praksi. Računalniško podprto oblikovanje in izdelava inlejev, onlejev, lusk, prevlek in drugih fiksnih zobnih nadomestkov sta se od devetdesetih let dalje močno razvila. S sodobno tehnologijo rezkanja lahko izdelamo skoraj vse zobne nadomestke, ki so bili nekoč izdelani ročno. Za izdelavo lahko uporabimo bloke kovinskih, polimernih ali keramičnih oz. porcelanskih materialov, ki tvorijo ogrodje za podporo fasetirnemu porcelanu ali monolitno restavracijo.

Dodajalna tehnologija omogoča natančen nanos kovine in polimernih materialov po plasteh, s čimer lahko izdelamo 3D-komponente zobnih nadomestkov, pa tudi pripomočke, kot so modeli, diagnostične modelacije v navosku, opornice in kirurška vodila. Z dodajalno tehnologijo lahko odpravimo pomanjkljivosti, ki se običajno pojavijo pri litju, polimerizaciji in sintranju.

Ti postopki in njihove izboljšave so zelo odvisni od materialov, ki so prirejani za uporabo s tehnologijami CAD/CAM. V zobozdravstvu so lastnosti materialov za uporabo s tehnologijami CAD/CAM pomembne, zato zobozdravniki in laboratorijski izvajalci izberejo določen material glede na določeno vrsto protetične oskrbe. Zaradi velikega števila razpoložljivih materialov se zobozdravniki in laboratorijski izvajalci soočajo z zapletenim postopkom odločanja pri izbiri materiala za določeno indikacijo.

V zobozdravstvu se je v zadnjem desetletju uveljavila uporaba brezkovinskih restavracij, kar je spodbudila potreba po zelo estetskih, biokompatibilnih in kakovostnih restavracijah. Razvite so bile polnokeramične tehnologije, ki jih lahko razdelimo v dve glavni skupini:

silikatna steklokeramika in oksidna keramika visoke trdnosti. Silikatna steklokeramika se uporablja za fasetiranje kovinskih ali polnokeramičnih ogrodiv, izdelavo majhnih restavracij, kot so inleji, onleji, luske in prevleke. Keramika visoke trdnosti, kot sta aluminijeva in cirkonijeva oksidna keramika, pa se uporablja kot osnovni material za prevleke in mostičke na predelih z visoko obremenitvijo zaradi žvečnih sil.

Poleg omenjenih dveh glavnih skupin keramičnih materialov so bili nedavno uvedeni tudi novi kompozitni materiali oz. hibridna keramika, ki omogoča rezkanje tanjših robov, ki jih prej ni bilo mogoče doseči z uporabo drugih keramičnih materialov. Poleg tega so lastnosti teh materialov za blaženje žvečnih sil ugodne tudi pri nadomeščanju zob z zobnimi vsadki.

V zobozdravstvu se poleg keramičnih materialov tudi kovinske zlitine in titan uporabljajo za izdelavo s tehnologijami CAD/CAM, ki ponujajo širok nabor možnosti uporabe v fiksni in snemni protetiki za klasične in z vsadki podprte zobne nadomestke.

Glede na to, da postopki CAD/CAM vključujejo različne metode, kot so rezkanje, tiskanje ali kombinacija obeh, je v tem poglavju razdelitev zobnih materialov za CAD/CAM predstavljena glede na njihov način izdelave in namen.

5.6 Materiali za rezkane zobne nadomestke v fiksni protetiki

Skupina dentalnih materialov za rezkanje vključuje predvsem keramiko in hibridne materiale ali kompozite.

Razvoj materialov za rezkanje je privedel do izboljšanja estetskih lastnosti, povečane trdnosti in lomne žilavosti ter uporabnosti za številne klinične indikacije. V splošnem je dentalna keramika umetni anorganski material, ki se ustvari s segrevanjem surovih mineralov in kovinskih oksidov pri visokih temperaturah, ki mu sledi hitro ohlajevanje. Keramika se lahko razvrsti na več načinov, med drugim glede na kemično sestavo (steklo, steklo s kristalnimi polnili, kristali s steklenimi polnili, polikristali itd.) in glede na metode obdelave (suho rezkanje, mokro rezkanje, tlačenje, slojenje itd.). Ta razvrstitev zobozdravnikom in laboratorijskim izvajalcem pomaga pri izbiri najprimernejšega materiala.

V preteklosti je bila uporaba keramičnih prevlek v zobozdravstvu omejena na oskrbo zob sprednjega predela, danes pa se uporabljajo tudi v stranskem predelu zobnih lokov, saj imajo zadovoljive fizikalne lastnosti za prenašanje žvečnih sil. Izboljšave kemične sestave in proizvodnih tehnik, ki se uporabljajo za izdelavo keramičnih materialov, so močno vplivale na mehanske lastnosti in klinično uporabnost končnih izdelkov.

Optimizacija keramičnih materialov za uporabo v enotah za rezkanje CAM je temeljni napredek dentalne tehnologije. V preteklosti so se uporabljali naravni materiali, kot je glinenec, trenutno pa se uporablja sintetično pridobljena keramika. Ta sprememba je prinesla številne izboljšave pri standardizaciji, nadzoru kakovosti in trajnosti materialov za rezkanje s tehnologijo CAD/CAM. Danes so ti materiali na voljo pri različnih proizvajalcih in so priporočeni za uporabo v številnih kliničnih primerih.

Pregled razvrstitve in kliničnih indikacij za uporabo različnih keramičnih materialov za rezkanje CAD/CAM v primerjavi z drugimi metodami izdelave prikazuje Tabela 2.

Tabela 2: Povzetek razvrstitve in indikacij keramičnih materialov (lastni vir).

VRSTA MATERIALA	METODA IZDELAVE	OGRODJE (O) POLNOKERAMIČNE PREVLEKE (P) LUSKA (L)
STEKLOKERAMIKA Z DELCI		
Feldšpatska keramika	Ognjevzdržna masa, platinska folija, tlačenje	P/L
Sintetična keramika		
Levcitna	Tlačenje, CAD/CAM	O/P/L
Litijev disilikat	Tlačenje, CAD/CAM	O/P/L
Fluorapatitna	Tlačenje, slojenje	L
S steklom infiltrirana keramika		
Aluminijev oksid	CAD/CAM	O
Aluminijev oksid in magnezijev oksid	CAD/CAM	O
Aluminijev oksid in cirkonijev oksid	CAD/CAM	O
OKSIDNA ALI POLIKRISTALINIČNA KERAMIKA		
Aluminijev oksid	CAD/CAM	O
Stabiliziran cirkonijev oksid	CAD/CAM	O/P
Cirkonijev oksid, ojačan z aluminijevim oksidom, in aluminijev oksid, ojačan s cirkonijevim oksidom	CAD/CAM	O/P
KERAMIČNI KOMPOZITI S POLIMERNO MATRICO		
Kompozit keramičnih nanodelcev, obdanih s polimerno matrico	CAD/CAM	P
Steklokeramika v polimerni matrici	CAD/CAM	P
S cirkonijevim in silicijevim oksidom infiltrirana polimerna matrica	CAD/CAM	P

5.6.1 Steklokeramika z delci

Steklokeramika z delci je anorganski keramični material, ki vsebuje stekleno fazo.

5.6.1.1 Feldšpatska keramika

Feldšpatska keramika je dentalni porcelan, ki se uporablja kot fasetirni material na ogrođjih kovinskih zlitin in keramičnih ogrođjih, ter estetski material, ki se veže neposredno na zobno strukturo za manjše estetske rekonstrukcije (inlej, onlej, estetske fasete). Trenutno so na voljo različni materiali, kot so IPS Empress Esthetic, IPS Classic (Ivoclar Vivadent, Lihtenštajn) in Vitadur, Vita VMK (Vita Zahnfabrik, Nemčija) (Slika 74).



Slika 74: Primer feldšpatske keramike za fasetiranje ogrođij (lastni vir).

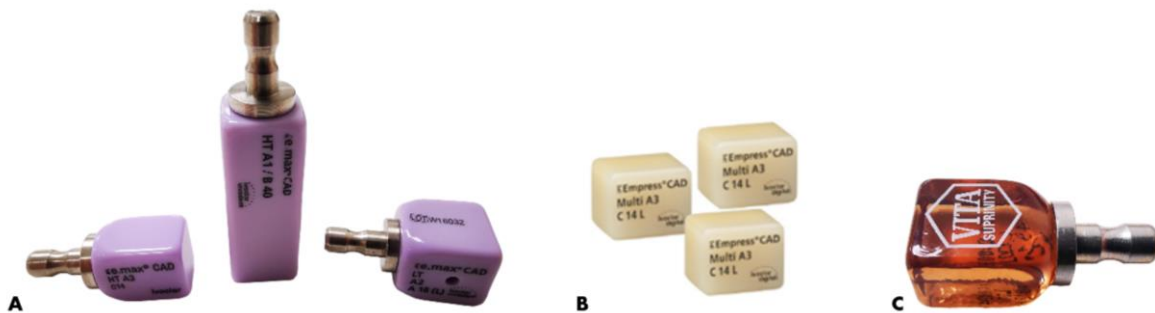
5.6.1.2 Sintetična keramika

Sintetična keramika je steklokeramika, polnjena z delci. Obstaja več vrst sintetične keramike:

- **Keramika na osnovi levcita**, npr. IPS d.Sign (Ivoclar Vivadent, Lihtenštajn); Vita VM 7, VM9, VM13 (VITA Zahnfabrik, Nemčija); Noritake EX-3, Cerabien, Cerabien ZR (Noritake, Japonska); Empress CAD (Ivoclar Vivadent, Lihtenštajn).
- **Keramika, sestavljena iz litijevega disilikata** ali njegovih derivatov, npr. keramični materiali: 3G HS (Pentron, ZDA); IPS e.max CAD, IPS e.max Press (Ivoclar Vivadent, Lihtenštajn); Obsidian (Glidewell Laboratories, ZDA); Suprinity (Vita Zahnfabrik, Nemčija); Celtra Duo (Dentsply, ZDA).
- **Keramika, ki temelji na fluorapatitu**, npr. IPS e.max Ceram (Ivoclar Vivadent, Lihtenštajn) in ZirPress (Ivoclar Vivadent, Lihtenštajn).

Pri fasetiranju keramičnih ogrodij je izjemno pomembno, da se uporabijo materiali, ki so prilagojeni koeficientu toplotnega raztezanja ogrodja. To preprečuje poškodbe, kot so pokanje in lomljenje zobnega nadomestka. Na trgu obstajajo fasetirni materiali, kot so Vita VM7 (Vita, Nemčija) in Noritake Cerabien (Noritake, Japonska) za ogrodja iz aluminijevega oksida in s steklom infiltrirane keramike ter Vita VM9 (Vita, Nemčija), Noritake Cerabien ZR (Noritake, Japonska) in IPS e.max Ceram (Ivoclar Vivadent, Lihtenštajn) za fasetiranje ogrodij, izdelanih iz cirkonijeve oksidne keramike.

Na Sliki 75 so prikazani bloki iz sintetične keramike, ki vključuje steklokeramiko, delno zapolnjeno z delci. Na delu slike A je v različnih velikostih blokov CAD/CAM prikazan litijev disilikat (E-max, Ivoclar Vivadent, Lihtenštajn), pod oznako B so bloki na osnovi levcita Empress CAD Multi (Ivoclar, Vivadent, Lihtenštajn), pod oznako C pa litijeva silikatna keramika Suprinity (Vita, Nemčija), ojačana s cirkonijem, na voljo v monokromatičnih blokih v dveh stopnjah prosojnosti.



Slika 75: Sintetična keramika v blokih (lastni vir).

Feldšpatski porcelani, ojačani s kristalno fazo, kot je levcitna keramika, imajo izboljšane mehanske lastnosti in so primerni za manjša ogrodja. Tudi izboljšane mehanske lastnosti litijevega disilikata omogočajo uporabo za inleje, onleje, prevleke in tričlenske mostičke v sprednjem predelu zobnega loka, ne glede na to, ali so izdelani z običajnim stiskanjem (IPS e.max Press) ali digitalno tehniko CAD/CAM (IPS e.max CAD).

5.6.1.3 S steklom infiltrirana keramika

Prva s steklom infiltrirana keramika, In-Ceram Alumina (Vita, Nemčija) (Slika 76), je bila predstavljena leta 1989. Zobni nadomestki iz tega materiala zaradi svoje neprosojnosti zahtevajo nanos porcelanskih faset za izboljšanje estetskih lastnosti.

In-Ceram Spinell (Vita, Nemčija) je s steklom infiltrirana keramika, uvedena leta 1994, ki vsebuje delce aluminijevega oksida in magnezijevega oksida. Sinteza materiala poteka podobno kot pri keramiki In-Ceram Alumina, vendar se steklo infiltrira v sintetično porozno jedro.

In-Ceram Cirkonij (Vita, Nemčija) je modifikacija keramike In-Ceram Alumina, pri kateri se sestavi aluminijevega oksida doda delno stabiliziran cirkonijev oksid za dodatno izboljšanje mehanskih lastnosti keramike.



Slika 76: Blok keramike In-Ceram Alumina CAD/CAM (lastni vir).

Zaradi povečane uporabe litijevega disilikata in cirkonijeve oksidne keramike, predvsem pri uporabi tehnologije CAD/CAM, se je uporaba tega materiala zmanjšala.

5.6.1.4 Oksidne ali polikristalinične vrste keramike

Polikristalinična keramika je anorganski keramični material brez steklene faze. Značilnost tega materiala je drobnozrnata kristalna struktura, ki zagotavlja trdnost in žilavost, vendar zmanjšuje prosojnost. Poleg tega odsotnost steklene faze preprečuje, da bi se ti materiali jedkali s kislinami.

Aluminijev oksid

Nobel Biocare je sredi devetdesetih let prvič predstavil aluminijev oksid visoke čistosti (Al_2O_3 – 99,5 %) kot osnovni material za izdelavo s tehnologijami CAD/CAM. Primera takega materiala sta: Procera AllCeram (Nobel Biocare, Švedska) in In-Ceram AL (Vita, Nemčija). Material ima zelo visoko trdoto in razmeroma visoko trdnost. Zaradi nagnjenosti k lomu jedra in uvajanja materialov z izboljšanimi mehanskimi lastnostmi, kot so zmožnost utrjevanja pri transformaciji, kakršne ima stabilizirana cirkonijeva oksidna keramika, je uporaba aluminijevega oksida upadla.

Cirkonijeva oksidna keramika, stabilizirana z itrijem

Čisti cirkonijev oksid obstaja v treh alotropnih oblikah: monoklinski, ki je stabilna do 1170 °C, nato preide v tetragonalno obliko, pri čemer se pojavlja strižna napetost in veliko (4-odstotno) povečanje prostornine. Pri temperaturi nad 2370 °C se cirkonijev oksid preoblikuje v kubično obliko. Pojav transformacije iz tetragonalne v kubično obliko prispeva k zapiranju razpok in povečanju odpornosti materiala proti lomu.

Za izvedbo postopka transformacijskega utrjevanja je v praksi potrebna stabilizacija tetragonalnih ali kubičnih faz pri sobni temperaturi z zlitjem čistega cirkonijevega oksida z oksidi, kot so itrij, magnezij, kalcij in cerij. Ti oksidi lahko v celoti ali delno stabilizirajo katero koli od teh faz. Slika 77 prikazuje disk iz cirkonijeve oksidne keramike pred postopki rezkanja in sintranja.



Slika 77: Disk surovca iz cirkonijeve oksidne keramike (vir: Interdent).

Na podlagi mikrostrukture lahko cirkonijevo oksidno keramiko razvrstimo na naslednje načine:

- FSZ – popolnoma stabilizirani cirkonijev oksid (ang. *fully stabilized zirconia*)
- PSZ – delno stabilizirani cirkonijev oksid, (ang. *partially stabilized zirconia*)
- TZP – tetragonalni cirkonijoksidni polikristali (ang. *tetragonal zirconia polycrystals*)

Cirkonijeva oksidna keramika lahko nastopa v različnih oblikah, odvisno od uporabljenih stabilizatorjev in mikrostrukture. V FSZ (ang. *fully stabilized zirconia*) je cirkonijev oksid v kubični obliki in vsebuje več kot 8 mol.% itrijevega oksida. PSZ (ang. *partially stabilized zirconia*) pa tvorijo tetragonalni ali monoklinski delci nanovelikosti v kubični matrici. TZP (ang. *tetragonal zirconia polycrystals*) pa so monolitni materiali, pretežno iz tetragonalne faze, stabilizirani najpogosteje z itrijem ali cerijem.

V protetiki se cirkonijeva oksidna keramika uporablja kot material za izdelavo ogrodič prevlek in mostov ter za monolitne restavracije. Najpogosteje se uporablja delno stabilizirana z itrijevim oksidom Y-TZP, saj ta oblika kaže največjo trdnost in žilavost po obdelavi in sintranju. Številka pred kratico (npr. 3Y-TZP) označuje molarni % itrijevega oksida.

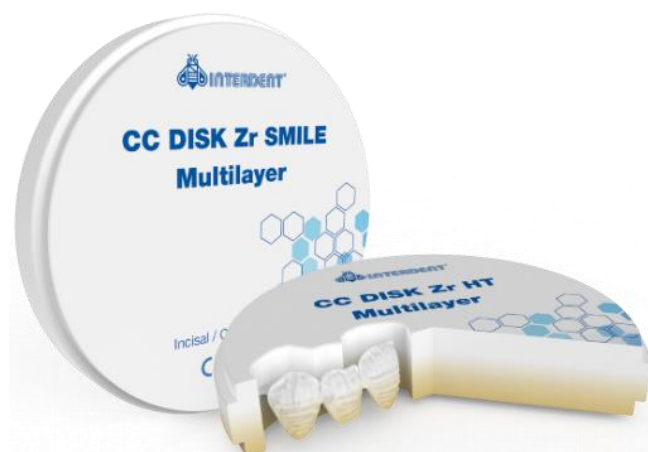
Obstaja možnost obarvanja restavracij iz cirkonijeve oksidne keramike z infiltracijo, prav tako pa se izdelujejo tudi polikromatski ali kombinirani bloki CAD/CAM za posnemanje barvnih prehodov med dentinom in sklenino. Prosojnost cirkonijevih materialov se z večjim deležem kubične faze povečuje, kar omogoča izdelavo bolj estetskih zobnih nadomestkov.

Pomembno je vedeti, da večji delež kubične faze slabi mehanske lastnosti materiala. Za stabilizacijo kubične faze se uporablja itrijev oksid, ki je prisoten v koncentraciji od 3 do 5 mol%. Na trgu so trenutno na voljo cirkonijeve oksidne keramike z oznakami 3Y-TZP, 4Y-TZP in 5Y-TZP v obliki blokov ali pa kot večplastni (ang. *multilayer*) diski.

Pri večplastnih diskih je pomembno poudariti, da imajo ti diski različne deleže kubične faze, odvisno od specifičnega dela diska. Ti diski se bistveno razlikujejo od diskov, ki so zgolj različno pigmentirani v različnih predelih (ang. *multicolor*). V incizalnih delih različno obarvanih diskov ne najdemo večje translucence, temveč zgolj drugačno pigmentacijo. Struktura večplastnih diskov (Slika 78) pa omogoča prisotnost translucenosti v incizalnem

delu, pri čemer so različne plasti sestavljene iz materialov z različnimi deleži kubične faze, kar povzroča različne lastnosti.

Nekateri diski so izdelani iz materiala 4Y- in 5Y-TZP (z manjšimi razponi) ali 3Y- do 5Y-TZP (z večjimi razponi), kot npr. IPS e.max® ZirCAD Prime (Ivoclar Vivadent, Lihtenštajn). Posledično imajo ti diski po rezkanju in sintranju različno prosojnost v predelu od incizalnega do cervikalnega dela.



Slika 78: Večslojni predbarvani supertranslucentni disk (vir: Interdent).

Pri uporabi cirkonijevih materialov (Tabela 3 in Tabela 4) je treba upoštevati tako prosojnost kot mehanske lastnosti, da bi dosegli optimalne zobne nadomestke.

Tabela 3: Primeri klasičnih vrst cirkonijeve oksidne keramike (lastni vir).

KLASIČEN CIRKONIJEV OKSID	PROIZVAJALEC	INDIKACIJA
Lava	3M Espe	Ogrodje, oporniki
Ceramill Zi	AmannGirbach	Ogrodje, oporniki
ICE Zirkon	Zirkonzahn	Ogrodje, oporniki
IPS e.max ZirCAD MO	Ivoclar Vivadent	Ogrodje prevlek in mostičkov z največ 2 členoma
Zenostar MO	Ivoclar Vivadent	Ogrodje, oporniki
Katana	Noritake	Ogrodje, oporniki
Zerion	Strauman	Ogrodje, oporniki
Vita YZ T	Vita Zahnfabrik	Ogrodje
Cercon Base	Dentsply Sirona	Ogrodje, oporniki
InCoris ZI	Dentsply Sirona	Ogrodje
Procera	Nobel Biocare	Ogrodje, oporniki
CC DISK Zr	Interdent	Ogrodje, oporniki

Tabela 4: Primeri prosojnih vrst cirkonijeve oksidne keramike (lastni vir).

PROSOJEN CIRKONIJEV OKSID	PROIZVAJALEC	INDIKACIJA
Zolid HT+ White ou Preshades	AmannGirbach	Solo prevleke, veččlenski mostovi
Zolid FX White ou Preshades ZolidFX Multilayer	AmannGirbach	Solo prevleke, 3-členski mostovi
Prettau Anterior	Zirkonzahn	Solo prevleke, 3-členski mostovi
Prettau	Zirkonzahn	Solo prevleke, veččlenski mostovi
IPS e.max ZirCAD MT Multi, IPS e.max ZirCAD MT	Ivoclar Vivadent	Solo prevleke, 3-členski mostovi
IPS e.max ZirCAD LT	Ivoclar Vivadent	Solo prevleke, od 3- do 4-členski mostovi (do 2 člena)
Zenostar MT	Ivoclar Vivadent	Solo prevleke, 3-členski mostovi
Zenostar T	Ivoclar Vivadent	Solo prevleke, veččlenski mostovi
Katana STML, Katana UTML	Noritake	Prevleke
Katana HT, Katana ML	Noritake	Solo prevleke, 3-členski mostovi
Lava Plus HT	3M Espe	Solo prevleke, veččlenski mostovi
Lava Esthetic Fluorescent	3M Espe	Solo prevleke, 3-členski mostovi
Zerion HT	Strauman	Solo prevleke, 3-členski mostovi
Vita YZ HT	Vita Zahnfabrik	Prevleke in mostovi
Cercon HT	Dentsply Sirona	Prevleke
InCoris TZI	Dentsply Sirona	Solo prevleke, 9-členski mostovi
Cara Zirconia ML	Kulzer	Solo prevleke, 4-členski mostovi (do 2 člena)
CC DISK Zr SMILE Multilayer	Interdent	Luska, inlej in onlej, reducirana prevleka, polna anatomsko prevleka, polni anatomski anteriorni most (3 členi)
CC Disk Zr HT Multilayer	Interdent	Inlej in onlej, reducirana prevleka, polna anatomsko prevleka, polni anatomski anteriorni most (3 členi), polni anatomski posteriorni most (3 členi), polni anatomski most (> 7 členov)

Cirkonijev oksid, ojačan z aluminijevim oksidom in aluminijev oksid, ojačan s cirkonijevim oksidom

Na trgu je nova inačica cirkonijevega oksida, utrjenega z aluminijevim oksidom, znanega tudi kot ATZ (ang. *Alumina-Toughened Zirconia*), in aluminijevega oksida, utrjenega s cirkonijevim oksidom, znanega kot ZTA (ang. *Zirconia-Toughened Alumina*). Ti materiali so sestavljeni iz dveh ali več različnih faz, ki imajo mikro- ali nanostrukturo. Odstotek cirkonijevega ali aluminijevega oksida v sestavi materiala je mogoče prilagoditi in ga

spremeniti glede na povpraševanje ali zahteve proizvajalca. Prednosti teh sestavljenih materialov v primerjavi z Y-TZP vključujejo odpornost proti razgradnji pri nizkih temperaturah, večjo trdnost in žilavost ter več kot dvakrat večjo trpežnost ob obremenitvah.

Cirkonijev oksid na splošno ostaja delno stabiliziran v tetragonalni fazi, medtem ko aluminijev oksid zagotavlja zmerno žilavost. V dentalni industriji se lahko pričakuje večja uporaba materialov ZTA in ATZ zaradi njihovih izboljšanih lastnosti.

5.6.1.5 Keramični kompoziti s polimerno matrico

Keramični kompoziti so kategorija materialov, ki vključujejo organsko (polimerno) matrico, ki je močno napolnjena z anorganskimi ognjevzdržnimi materiali, kot so porcelan, steklo, keramika in steklokeramika.

Sestave različnih vrst keramike s polimerno matrico se močno razlikujejo med seboj, vendar so posebej oblikovane za tehnologije CAD/CAM. Materiali, ki spadajo v to kategorijo, so opredeljeni glede na prevladujočo sestavo anorganskih ognjevzdržnih spojin (> 50 mas.%), ne glede na prisotnost manj prevladujoče organske faze (polimera).

Razvoj keramičnih kompozitov je bil spodbujen z namenom razviti materiale, ki jih je lažje obdelovati in so prilagodljivejši kot steklo, napolnjeno z delci, (npr. sintetična keramika iz družine litijevega disilikata) ali polikristalinična keramika. Poleg tega se te materiale zaradi sestave lažje popravlja in dodaja z uporabo kompozitov.

Kompozit keramičnih nanodelcev, obdanih s polimerno matrico

Ti materiali, kot je na primer Lava Ultimate (3M ESPE, ZDA) (Slika 79), vsebujejo visoko zamreženo polimerno matrico, ki je ojačana s približno 80 % keramičnih nanodelcev. Ta kombinacija nanodelcev vključuje silicijev dioksid (premera 20 nm), cirkonijev oksid (premera od 4 do 11 nm) in cirkonijev oksid (vezan v agregate nanodelcev), kar zmanjša razmik med polnilnimi delci in s tem zagotavlja visoko vsebnost nanodelcev keramike.



Slika 79: Blok surovca s polimerno matrico in keramičnimi nanodelci (lastni vir).

Steklokeramika v polimerni matrici

Ti materiali (npr. Enamic, Vita, Nemčija, Slika 80) imajo običajno dvojno mrežo, ki jo proizvajalci imenujejo hibridna keramika. Sestavljajo jo feldšpatska keramična mreža (86 mas.%/75 % prostornina) in polimerna mreža (14 mas.%/25 vol.%). Polimerno mrežo sestavljata uretan dimetakrilat (UDMA) in trietilen glikol dimetakrilat (TEGDMA). Sestava take hibridne keramike omogoča izjemno absorpcijo žvečnih sil. Zaradi svoje elastičnosti pa dopušča izdelavo zelo tankih restavracij (0,3 mm).



Slika 80: Hibridna keramika z dvojno keramično-polimerno mrežo (vir: Interdent).

S cirkonijevim in silicijevim oksidom infiltrirana polimerna matrica

Materiali, kot je na primer Shofu Block HC proizvajalca Shofu (Japonska), so prilagojeni različnim organskim matricam in masnim deležem keramike (npr. silicijev dioksid v prahu, cirkonijev silikat, UDMA, TEGDMA, pirogena kremenica, pigmenti). Ti materiali vsebujejo

več kot 60 % teže anorganske vsebnosti. Drug primer je kompozit, ki sestoji iz 85 % ultrafinih silikatnih in cirkonijevih oksidnih keramičnih delcev (sferičnih 0,6 um), vgrajenih v polimerno matrico, ki vključuje bis-GMA, TEGDMA in patentirani ternarni sistem iniciatorjev. Primer takega kompozita je MZ100 Block proizvajalca 3M ESPE (ZDA), ki ga tržijo pod imenom Paradigm™ MZ-100 Blocks.

5.7 Materiali za rezkane začasne zobne nadomestke

V fiksni protetiki se za izdelavo rezkanih začasnih zobnih nadomestkov pogosto uporablja material polimetil metakrilat (PMMA) (Slika 81). Ta material je namenjen uporabi v rezkalnih strojih CAD/CAM in se uporablja za izdelavo provizorijev, oblikovanje dlesni po vstavitvi zobnih vsadkov, pred vstavitvijo končnih protetičnih konstrukcij iz cirkonijeve oksidne keramike.

Za izdelavo dolgotrajnih začasnih restavracij se uporabljajo diski CAD/CAM, ki vsebujejo kompozitni material. Ta material je sestavljen iz visokopremreženega akrilatnega polimera z mikropolnilom (Slika 82). Uporaba takih diskov omogoča izdelavo trpežnih začasnih restavracij, ki zagotavljajo ustrezen videz in funkcijo.



Slika 81: Disk PMMA za izdelavo provizorijev (vir: Interdent).



Slika 82: Kompozitni disk za izdelavo začasnih restavracij (vir: Interdent).

5.8 Materiali za rezkanje totalnih protez

Razvoj digitalne izdelave totalnih protez še ne dosega ravni postopkov CAD/CAM za fiksno protetične izdelke. Kljub temu pa so se razvili novi materiali in digitalni pristopi za izdelavo protez. Čeprav so postopki CAD/CAM za izdelavo totalnih protez še v fazi razvoja, so trenutni materiali za bazo protez zmožni zagotoviti zadovoljiv oprijem akrilatnih zob ter zagotavljajo zadostno trdnost totalne proteze v funkciji.

5.8.1 Polimetil metakrilat (PMMA)

Eden izmed trenutno razpoložljivih materialov za izdelavo totalnih protez je disk polimetil metakrilata (PMMA), ki ima upogibno trdnost ≥ 65 MPa ter žilavost $\geq 1,9$ MPa, npr. IvoBase CAD, Ivoclar Vivadent (Lihtenštajn); CC Disk PMMA Pink, Interdent (Slovenija); PINK CAD-CAM DISK basic, Polident (Slovenija). Ta material je na voljo v različnih rožnatih odtenkih (Slika 83).



Slika 83: CC Disk PMMA Pink (lastni vir).

Na voljo so tudi voščeni diski v rožnati barvi, primerni za rezkanje in nadaljnji klasični postopek izdelave totalne proteze. Ta sistem ponuja tudi dvokomponentno lepilo v rožnati barvi, ki zagotavlja trdno vez med garniturami zob in bazami za proteze, ki jih izdeluje enota CAM. Stroški izdelave rezkanih protez so še vedno visoki zaradi investicije v enoto CAM, odpadnega materiala in obrabe rezkalnega orodja.

5.9 Materiali za izdelavo z dodajalnimi tehnologijami

Materiali za tiskanje zobnih nadomestkov obsegajo predvsem polimere, kovino in keramiko, pri čemer se vsaka kategorija uporablja za določeno vrsto dodajalne tehnologije. Na trgu so že na voljo prvi materiali, primerni za začasno in končno oskrbo, vendar je večina teh materialov še vedno v fazi razvoja.

Polimeri

Polimerni materiali, kot so akrilonitril butadien stiren (ABS), polikarbonat (PC), polimlečna kislina (PLA), poliamid (PA) in poliuretan (PU), se uporabljajo za izdelavo delovnih modelov in nadomeščanje voščene modelacije pri izdelavi ogrodij s precizijskim litjem. Ti materiali so primerni za tisk z nizko natezno, a zadostno upogibno trdnostjo, kar omogoča izdelavo natančnih modelov z minimalnimi deformacijami. Biokompatibilni fotopolimeri se uporabljajo začasne in dolgotrajnejše zobne nadomestke.

Kovine

Dentalne zlitine so eden glavnih materialov za izdelavo protetičnih konstrukcij, zato morajo imeti pravilne mehanske in druge lastnosti, ki jih zahteva specifično okolje, v katerem se bodo uporabljale. Njihova ključna vloga je zagotoviti dobro prenašanje mehanskih obremenitev, odlično odpornost proti koroziji in predvsem biokompatibilnost. V dodajalni tehnologiji se za izdelavo kovinskih ogrodij zobnih nadomestkov uporabljajo kovinski materiali zlitin, kot so kobalt-krom (Co-Cr) in titan (Ti).

- **Kobalt-kromove (Co-Cr) zlitine** so alternativa nikljevim zlitinam, saj ne vsebujejo niklja, ki je pogosto vzrok za alergijske reakcije. Vsebujejo najmanj 60 % kobalta in približno 20 % kroma. Kobalt zagotavlja trdnost in žilavost zlitin. Krom v zlitini pa igra ključno vlogo pri kemični zaščiti pred obarvanjem in korozijo s svojim pasivacijskim učinkom. Mediloy (Bego, Nemčija) je konkreten primer zlitine, ki je bila posebej razvita za proizvodni proces SLM. Sestavljena je iz kobalta, kroma, volframa in molibdena.
- **Titan (Ti)** ima številne prednosti, med katerimi so dobra korozijska obstojnost, visoka trdnost, odlična biokompatibilnost in zelo dobra osteointegracija. Poleg tega ima nizko gostoto in ni feromagneten. Vendar ima pomanjkljivosti, kot so slabša kemična vez s keramiko in koeficient raztezka, ki ni kompatibilen s keramiko, ki

vsebuje levcit. Starbond Ti5 Powder 45 (S&S Scheftner, Nemčija) je primer titanove zlitine za proizvodni proces SLM.

Keramika

Keramični materiali, med katerimi sta cirkonijev (ZrO_2) in aluminijev oksid (Al_2O_3), so v zobozdravstvu zelo uporabni za izdelavo keramičnih ogrodij in keramičnih monolitnih restavracij. Ti materiali so poznani po svoji visoki trdnosti, odpornosti proti obrabi in estetskih lastnostih. Postopek 3D-tiskanja keramike, znan tudi kot robocasting, se uporablja za izdelavo prevlek ali ogrodij. Pri tem postopku se uporablja tehnologija ekstruzije koloidnih past cirkonijevega in aluminijevega oksida za pridobivanje struktur zapletenih oblik. Koloidna pasta keramičnih delcev mora imeti za ta postopek primerno viskoznost, da se z zmernim pritiskom ekstruzije lahko oblikujejo želeni izdelki. Poleg tega se mora koloidna pasta tudi sušiti in sintrati s čim manjšimi spremembami oblike in čim višjo gostoto. Čeprav je tehnologija za izdelavo keramičnih zobnih nadomestkov z aditivno tehnologijo še vedno v fazi razvoja, je zagotovo obetavna in predstavlja pomemben korak naprej v izdelavi zobnih nadomestkov.

Pri izbiri materialov za tisk je treba upoštevati različne dejavnike, kot so namen uporabe izdelka, zahtevana trdnost in estetske zahteve. Sodobni materiali za dodajalne tehnologije so vse bolj specializirani za posamezne namene in omogočajo izdelavo izdelkov z izjemno natančnostjo, kar bistveno poveča kakovost in trajnost oskrbe.

Slika 84 prikazuje materiale za dodajalne tehnologije: A – filament za ekstrudiranje materiala (FDM), B – praškasti material za selektivno lasersko sintranje (SLS) in C – smolo fotopolimera za stereolitografijo (SLA).



Slika 84: A – filament, B – praškasti in C – tekoči material za izdelavo z dodajalno tehnologijo (lastni vir).

5.10 Povzetek

Razvoj materialov za tehnologije CAD/CAM je znatno izboljšal kakovost in nadzor nad končnimi izdelki, kar omogoča predvidljivejšo protetično oskrbo. Keramika za tehnologije CAD/CAM se je izkazala za zelo učinkovito, saj so rezultati z vidika marginalne natančnosti in kakovosti restavracije v celoti klinično sprejemljivi. Materiali za dodatno tehnologijo pa v primerjavi s tehnologijo rezkanja še vedno zahtevajo izboljšave.

V zobni protetiki se steklokeramika, kompoziti in keramika visoke trdnosti zlasti uspešno uporabljajo za manjše restavracije, kot so inleji, onleji in prevleke, in zato pridobivajo vse večji tržni delež. Izdelki iz cirkonijske oksidne keramike so uporabni tudi pri oskrbi zob v stranskem predelu zobnih lokov.

Provizoriji, izdelani s tehnologijo CAD/CAM, so pomembni v digitalnem delovnem postopku, saj služijo za dolgotrajno začasno oskrbo, lahko pa tudi kot prototip končne restavracije, pri čemer ti materiali kažejo izboljšane mehanske lastnosti v primerjavi z običajnimi začasnimi materiali.

Izdelki CAD/CAM iz neplemenitih zlitin in titana v fiksni in snemni protetiki na zobeh in vsadkih predstavljajo stroškovno učinkovito, natančno in zanesljivo alternativo restavracijam iz plemenitih zlitin ter ponujajo širok spekter uporabe. Tehnologija robocasting, ki ustvarja slojevite 3D-strukture, predstavlja obetavno metodo izdelave dentalne keramike.

6.6 Vprašanja:

- Kateri materiali se uporabljajo pri izdelavi CAD v zobozdravstvu?
- Naštej indikacije za uporabo cirkonijeve oksidne keramike v zobozdravstvu.
- Katere so prednosti keramike s polimerno matrico?
- Kateri materiali se uporabljajo za rezkanje TP?
- Kateri materiali se uporabljajo pri dodajalnih tehnologijah v zobozdravstvu?
- Kateri material bi uporabili za izdelavo keramičnega inleja in zakaj?
- Kje in zakaj je treba upoštevati koeficient toplotnega raztezanja?
- Kakšna je sestava sintetične keramike?
- Kateri material bi uporabili za izdelavo veččlenskega mostu v stranskem predelu zobnih lokov?

LITERATURA IN VIRI

- Abi, C. B., Emrullahoglu, O. F., & Said, G. (2013). Microstructure and mechanical properties of Mg-stabilized ZrO₂-Al₂O₃ dental composites. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 18, 123–131.
- ADA. (2013). *ADA - CDT/Code on Dental Procedures and Nomenclature*. <http://www.ada.org/2614.aspx?currentTab=2>
- Ahlberg, J. P., Kovero, O. A., Hurmerinta, K. A., Zepa, I., Nissinen, M. J., & Kononen, M. H. (2003). Maximal bite force and its association with signs and symptoms of TMD, occlusion, and body mass index in a cohort of young adults. *Cranio*, 21(4), 248–252.
- Alghazzawi, T. F. (2016). Advancements in CAD/CAM technology: Options for practical implementation. *J Prosthodont Res*. 60(2), 72-84.
- Alter, D. (2014). Subtractive computer-aided manufacturing in dental milling. Producing high-quality restorations with greater detail and consistency. *Inside Dental Technology*, 5(2).
- Alter, D. (2015). Proper integration of milling machines and services. *Inside Dental Technology*, 6(4), 50–52.
- Anusavice, K. J. (2012). *Phillips' science of dental materials*. Saunders.
- Att, W., & Girard, M. (2014). Digital workflow in reconstructive dentistry. In: J. L. Ferencz, N. R. F. A. Silva, J. M. Navarro (Ed.). *High-strength Ceramics: Interdisciplinary Perspectives*. (pp. 260–77). Quintessence Publishing.
- Att, W., Witkowski, S., & Strub, J. R. (2019). *Digital Workflow in Reconstructive Dentistry* (1st ed.). Quintessence Publishing.
- Balič, J. (2010). Prilagodljivi in inteligentni obdelovalni sistemi ter računalniško integrirana proizvodnja. In: K. Kuzman (Ed.), *Moderno proizvodno inženirstvo*. (pp. 1042–1131). Grafis Trade.
- Baltzer, A. (2007). *Oxidkeramiken und CAD/CAM-Technologie: Atlas für Klinik, Labortechnik und Werkstoffkunde*. Deutscher Ärzteverlag.
- Ban, S. (2008). Reliability and properties of core materials for all-ceramic dental restorations. *Japanese Dental Science Review*, 44(1), 3–21.
- Beuer, F., Schweiger, J., Edelhoff, D., & Sorensen, J. A. (2011). Reconstruction of esthetics with a digital approach. *Int J Periodontics Restorative Dent*, 31(2), 185–193.

- Beuer, F., Schweiger, J., & Edelhoff, D. (2008). Digital dentistry: an overview over recent development for CAD/CAM generated restorations. *Br Dent J*, 204(9), 505–511.
- Birnbaum, N. S., & Aaronson, H. B. (2011). Digital dental impression systems. *Inside Dentistry*, 7(2), 1–6.
- Brown, C. (2013). Options in dental milling. *Inside Dental Technology*, 4(6), 1-4.
- Budak, I., Kosec, B., & Sokovic, M. (2012). Application of contemporary engineering techniques and technologies in the field of dental prosthesis. *J Archiv Mater Manufact Engineer* 54(2): 233–41.
- Bunek, S. S., Brown, C., & Yakas, M. (2014). The evolving impression of digital dentistry. *Inside Dentistry*, 10(1), 35–39.
- Bunek, S. S., Brown, C., & Yakas, M. (2014). The evolving impressions of digital dentistry. How CAD/CAM technology continues to drive innovation. *Inside Dentistry*, 10(1), 35–39.
- Burgess, J. O., Lawson, N. C., & Robles, A. (2013). Comparing digital and conventional impressions: assessing the accuracy, efficiency, and value of today's systems. *Inside Dentistry*, 9(11), 68–74.
- Chevalier, J., Grandjean, S., Kuntz, M., & Pezzotti, G. (2009). On the kinetics and impact of tetragonal to monoclinic transformation in an alumina/zirconia composite for arthroplasty applications. *Biomaterials*, 30(29), 5279–5282.
- Chevalier, J., Gremillard, L., Virkar, A. V., & Clarke, D. R. (2009). The Tetragonal-Monoclinic Transformation in Zirconia: Lessons Learned and Future Trends. *Journal of the American Ceramic Society*, 92(9), 1901–1920.
- Child, P. L. (2011). Digital dentistry: Is this the future of dentistry? *Dental Economics*, 101(10), 66–69.
- Claussen, N. (1976). Fracture Toughness of Al₂O₃ with an Unstabilized ZrO₂ Dispersed Phase. *Journal of the American Ceramic Society*, 59(1-2), 49–51.
- Culp, L. (2006). Computerized occlusion in the laboratory. In W. H. Mormann (Ed.), *State of the Art CAD/CAM Restorations* (pp. 203–210). Quintessence Publishing.
- Denry, I. L. (2006). Restorative materials - ceramics. In J. M. Powers & R. L. Sakaguchi (Eds.), *Craig's Restorative Dental Materials* (pp. 253–275). Elsevier India.
- DIN ISO 5725-1 (1997-11). Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — part 1: general principles and definitions.
- Drstvenšek, I. (2010). Slojevite dodajalne tehnologije. In: K. Kuzman (Ed.), *Moderno proizvodno inženirstvo* (pp. 777–812). Grafis Trade.

- Duke, E. S. (2004). Taking the mystery out of CAD/CAM in dental practice. *Compend Contin Educ Dent*, 25(2), 140–143.
- Ender, A., & Mehl, A. (2011). Full arch scans: conventional versus digital impressions - an invitro study. *International Journal of Computerized Dentistry*, 14(1), 11–21.
- ESPE 3M. (2013). *Website communication to dental professionals*.
http://solutions.3m.com/3MContentRetrievalAPI/BlobServletIcmd=1357744363000&locale=en_WW&assetType=MMM_Image&assetId=1319230699460&blobAttribute=ImageFile
- Exocad. (n. d.). *Exocad*. Dostopno na: https://wiki.exocad.com/wiki/index.php/Main_Page
- Fasbinder, D. (2006). Predictable CEREC occlusal relationships. In: H. Werner (Ed.), *State of the Art CAD/CAM Restorations*. (pp. 93–100). Mormann.
- Fasbinder, D. (2012). Using digital technology to enhance restorative dentistry. *Compend Contin Educ Dent*, 33(9), 666–8, 670, 672 passim.
- Ficko, M., Berus, L., & Potočnik, D. (2021). Tehnologija numerično krmiljenih strožnic z gnanimi orodji. Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo.
- Filser, F., Kocher, P., Weibel, F., Lüthy, H., Scharer, P., & Gauckter, L. J. (2001). Reliability and strength of all-ceramic dental restorations fabricated by direct ceramic machining (DCM). *Int J Comput Dent*, 4(2), 89–106.
- Flügge, T. V., Nelson, K., Nahles, S., & Metzger, M. C. (2013). *Precision of intraoral digital dental impressions with iTero and extraoral digitization with the iTero and a model scanner*. Am Orthod Dentofacial Orthop.
- Fradeani, M. (2004). *Esthetic Analysis: A Systematic Approach to Prosthetic Treatment*. Quintessence Pub.
- Frank, E., & Frank, S. (2012). Bite registration in Cerec and inLab. *International Journal of Computerized Dentistry*, 15(1), 149–158.
- Galante, J. M., & Rubio, N. A. (Eds.). (2021). *Digital Dental Implantology: From Treatment Planning to Guided Surgery* (1st ed.). Springer.
- Ganz, S. D. (2012). The next evolution in CBCT: combining digital technologies. A precise approach to planning dental implant reconstruction enhances accuracy. *Inside Dentistry*, 9(2).
- Gehrt, M., Wolfart, S., Rafai, N., Reich, S., & Edelhoff, D. (2013). Clinical results of lithium-disilicate crowns after up to 9 years of service. *Clinical Oral Investigations*, 17(1), 275–284.

- Giordano, R., & McLaren, E. A. (2010). Ceramics overview: classification by microstructure and processing methods. *Compend Contin Educ Dent*, 31(9), 682–684.
- Harsono, H., Simon, J. F., Stein, J. M., & Kugel, G. (2012). Evolution of chairside CAD/CAM dentistry. *Inside Dentistry*, 130(3), 76–81.
- Helvey, G. A. (2008). Zirconia and computer-aided design/computer-aided manufacturing (CAD/CAM) dentistry. *Inside Dentistry*, 4(4).
- Hughes, K. (2013). A 3D-printed future. How additive manufacturing stands to transform dental technology manufacturing processes. *Inside Dental Technology*, 4(8), 46–49.
- Hughes, K. (2014). 3D printing technology. *Inside Dentistry*, 10(6), 34–8.
- Interdent. (n. d.). *Interdent web shop: Laboratorij*. <https://shop-interdent.si/>
- ISO. (2019). *Dentistry — Digitizing devices for CAD/CAM systems for indirect dental restorations — Test methods for assessing accuracy*. Dostopno na: <https://www.iso.org/standard/68414.html>
- Jain, P., & Gupta, M. (Eds.). (2021). *Digitization in Dentistry: Clinical Applications* (1st ed.). Springer.
- Jakovac, M. (2023). Protokol: stručna knjiga. Zagreb: Stega tisak, 227–263.
- Kim S-Rt, Lee W-S, Kim W-C, Kim H-Y, & Kim J-H. (2016). Digitization of dental alginate impression: three-dimensional evaluation of point cloud. *Dent Mater J*. 34(6), 835–840.
- Kinariwala, N. & Samaranayake, L. P. (2021). *Guided Endodontics*. Springer International Publishing.
- Kordab B. C.. (2011). Comparison of computer generated occlusal surfaces with functionally waxed-on surfaces. *International Journal of Computerized Dentistry*, 14(1), 23–31.
- Koutsoukis, T., Zinelis, S., Eliades, G., et al. (2015). Selective laser melting technique of Co-CR Dental Alloys: a review of structure and properties and comparative analysis with other available techniques. *Journal of Prosthodontics*, 24(4), 303–12.
- Lee W, Park J, Kim J, Kim H, Kim W, & Yu C. (2016). New approach to accuracy verification of 3D surface models: an analysis of point cloud coordinates. *J Prosthodont Res*, 60(2), 98–105.
- McLaren, E. A., & Rifkin, R. (2002). Macroesthetics: facial and dentofacial analysis. *J Calif Dent Assoc*, 30(11), 839–846.

- McLaren, E. A., & TranCao, P. (2009). Smile analysis and esthetic design: “in the zone.” *Inside Dentistry*, 5(7).
- Mehl A. (2012). A new concept for the integration of dynamic occlusion in the digital construction process. *Int J Comput Dent*, 15(2), 109–123.
- Mönkmeyer, U., Poerschke, F., Kurbad, A., Reichel, K., & Schart, V. (2005). Die präfabrizierte, anatomische, polychrome CAD/CAM-Krone. *Quintessenz zahntechnik*, 4(2005), 368–380.
- Muck, T., & Križanovskij, I. (2019). *3D-tisk*. Tehniška založba Slovenije.
- Nagel, M., & Striezel, R. (2003). *Ein neues CAD/CAM-Verfahren: Bego Medifactoring*. Paper presented at Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Dentale Technologie e.V., Sindelfingen.
- Orfanidis, J. (2012). CAD/CAM milling units. *Inside Dental Technology*, 3(2).
- Otto, T., & De Nisco, S. (2002). Computer-aided direct ceramic restorations: a 10-year prospective clinical study of Cerec CAD/CAM inlays and onlays. *International Journal of Prosthodontics*, 15(2), 122–128.
- Patel, N. (2014). Contemporary dental CAD/CAM: modern chairside/lab applications and the future of computerized dentistry. *Compendium of Continuing Education in Dentistry*, 35(10), 739–746.
- Persson, A., Andersson, M., Oden, A., & Sandborgh-Englund, G. (2006). A three-dimensional evaluation of a laser scanner and a touch-probe scanner. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 95(3), 194–200.
- Persson, M., Andersson, M., & Bergman, B. (1995). The accuracy of a high-precision digitizer for CAD/CAM of crowns. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 74(3), 223–229.
- Poticny, D. J. (2008). CAD/CAM today: a 22-year retrospective. *Inside Dentistry*, 4(10).
- Reiss, B. (2006). Clinical results of Cerec inlays in a dental practice over a period of 18 years. *Int J Comput Dent*, 9(1), 11–22.
- Reiss, B. (2012). Cerec 4.0: articulation and more. *International Journal of Computerized Dentistry*, 15(1), 137–148.
- Ringer, J. (2007). Digital smile enhancement: an essential modality for any successful cosmetic practice. *Dent Today*, 26(5), 84, 86, 88–89.
- Rosenstiel, S. F., Land, M. F., & Fujimoto, J. (2022). *Contemporary Fixed Prosthodontics* (6th ed.). Elsevier - OHCE.
<https://bookshelf.health.elsevier.com/books/9780323765015>

- Santos, G. C. Jr., Thompson, V. P., Ferencz, J. L., Silva, N. R. F. A., Estevam, A., Bonfante, E. A. (2015). A New Classification System for All-Ceramic and Ceramic-like Restorative Materials. *International Journal of Prosthodontics*, 29(3), 227–235.
- Schweiger, J., & Kieschnick, A. (2020). *CAD/CAM in digital dentistry*. Teamwork media GmbH.
- Shull, G. F. (2015). An update on CAD/CAM dentistry. *Dental Learning*, 4(2), 1–9.
- Silva, N., Witek, L., Coelho, P., Thompson, V., Rekow, E., & Smay, J. (2011). Additive CAD/CAM process for dental prosthesis. *Journal of Prosthodontics*, 20(2), 93–96.
- Sjogren, G., Molin, M., & van Dijken, J. W. (2004). A 10-year prospective evaluation of CAD/CAM Tnanufactured (Cerec) ceramic inlays cemented with a chemically cured or dual-cured resin composite. *Int J Prosthodont*, 17(2), 241–246.
- (2018). International Organization for Standardization.
- Stines, S. (2005). Intraoral CAD/CAM technology: establishing appropriate occlusion using virtual articulation. *Compendium*, 26(9), 632–636.
- Tamimi, F., & Hirayama, H. (Eds.). (2019). *Digital Restorative Dentistry: A Guide to Materials, Equipment, and Clinical Procedures* (1st ed.). Springer.
- Tapie, L., Lebon, N., Mawussi, B., Fron Chabouis, H., Duret, F., & Attal, J. R. (n. d.). Understanding dental CAD/CAM for restorations—the digital workflow from a mechanical engineering viewpoint. *Int J Comput Dent*.
- Wiskott, H. W. A. (2011). *Fixed Prosthodontics: Principles and Clinics* (1st ed.). Quintessence Pub Co.
- Zandparsa, R. (2014). Digital imaging and fabrication. In L. T. Garcia (Ed.), *Dental Clinics of North America, Prosthodontics* (Vol. 58, Issue 1, pp. 135–158).