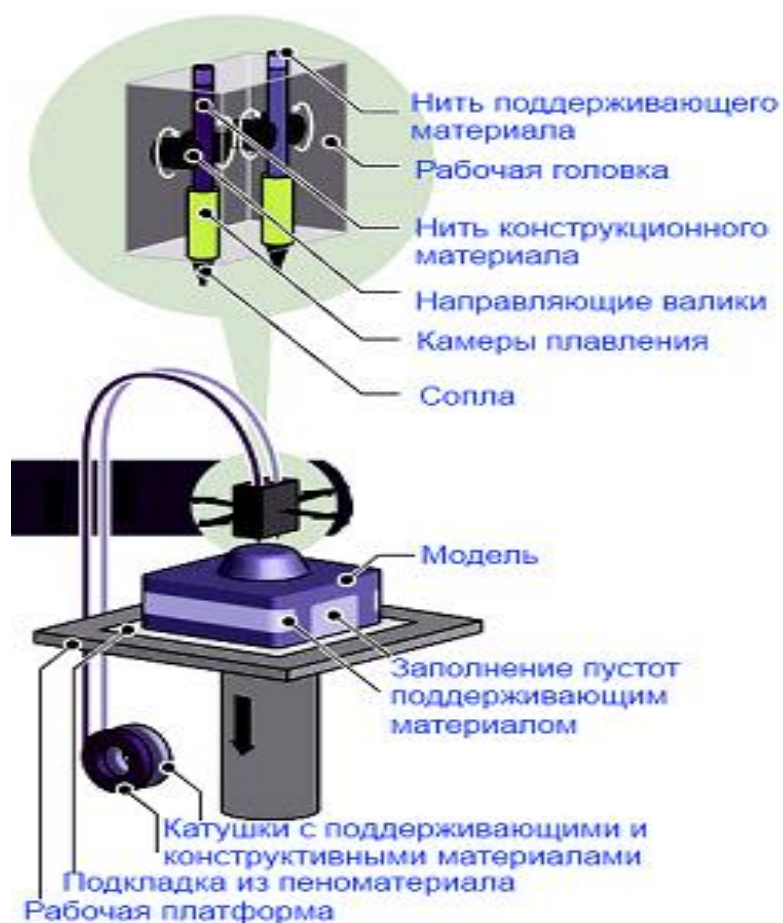


## Дәріс 7

### 3D басып шығару әдісіндегі балқыту арқылы қабаттап біріктіріп (FDM) заттарды өндіру

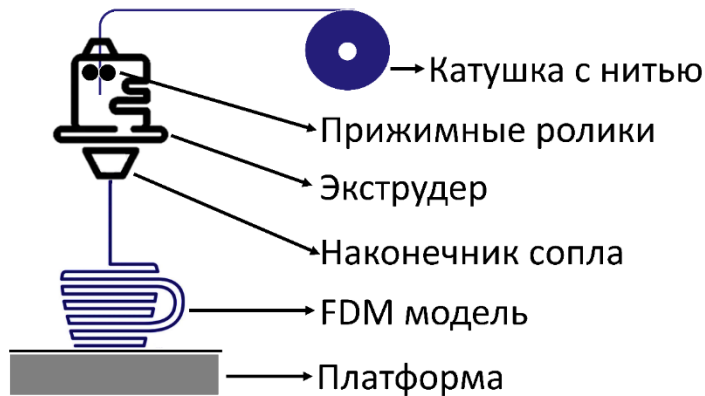
#### FDM технологиясы

Балқытылған полимерлі жіппен қабат-қабат басып шығару (FDM технологиясы), сондай-ақ балқытылған тұндыру үлгілеуі немесе жай FDM ретінде белгілі, функционалдығы сериялық өнімдерге жақын жеке өнімдерді шығару үшін, сондай-ақ жоғалған балауыз қалыптарын өндіру үшін қолданылады. металл құюға арналған.



3-сурет - FDM басып шығару технологиясы

FDM технологиясы келесідей: температурасы бақыланатын экструдерлік бас ABS пластиктен, балауыздан немесе поликарбонаттан жасалған жіптерді жартылай сұйық күйге дейін қыздырады және алынған термопластикалық модельдеу материалын жұқа қабаттармен 3D принтердің жұмыс бетіне жоғары дәлдікпен жеткізеді. Қабаттар бір-біріне жағылады, біріктіріледі және қатайтылады, бірте-бірте дайын өнімді қалыптастырады.



4-сурет – FDM басып шығару технологиясы, экструдермен жіптерді қолдану процесі

FDM технологиясы ең кең таралған және қолжетімді 3D басып шығару технологияларының бірі болып табылады. Ол қарапайымдылығына, материалдардың қолжетімділігіне және ұзақ және функционалды прототиптерді жасау мүмкіндігіне байланысты әуесқойлық және кәсіби параметрлерде қолданылады. FDM принтерлері PLA, ABS, PETG, нейлон, көміртекті талшық композиттері, ағаш шаңы және металдар сияқты кең ауқымды материалдарды пайдалана алады. Бұл оларды әртүрлі қолданбалар үшін жан-жақты етеді.

FDM принтерлерін пайдалану оңай, бұл оларды жаңадан бастаған пайдаланушылар мен оқу орындары үшін тартымды етеді. Бұл принтерлерді орнату және калибрлеу де салыстырмалы түрде қарапайым. FDM көмегімен басып шығарылған өнімдер өте берік және берік, бұл оларды функционалды қолданбаларда және тіпті соңғы өнімді өндіруде пайдалануға мүмкіндік береді. FDM принтерлері және олардың материалдары SLA (стереолитография) немесе SLS (таңдамалы лазерлік агломерация) сияқты басқа 3D басып шығару технологияларымен салыстырғанда арзанырақ. Бұл оларды шағын бизнес пен жеке пайдаланушыларға қолжетімді етеді.

FDM процесі термопластикалық жіптің катушкасынан басталады, ол қысқыш роликтер арқылы экструдерге беріледі. Экструдерде термопластикалық жіпті балку температурасынан жоғары температураға дейін қыздырады, содан кейін үш өлшемді объектілерді жасау үшін саптама арқылы жұмыс платформасына экструдалған [4,5]. Экструдалған қабаттар арасындағы адгезияны жақсарту үшін құрылыс платформасын жылытуға болады, осылайша дайын өнімдердегі ақауларды болдырмайды. Экструдер температурасы жіптің реологиялық қасиеттеріне айтарлықтай әсер етеді және сондықтан FDM процесінің маңызды аспектісі болып табылады. Реология материалдардың деформациясы мен ағынын зерттейді, мұнда тұтқырлық ағынға төзімділікті сипаттайтын маңызды параметр болып табылады [6]. 3D басып шығару үшін қолданылатын полимерлер контекстінде реология FDM процесі кезінде балқытылған полимердің ағындық сипаттамаларына назар аударады [7]. FDM

процесінің тиімділігі қоректік жіптердің реологиялық қасиеттерін бақылауға байланысты. Ығысу ағынының сипаттамалары молекулалық салмақ, молекулалық салмақтың таралуы және тізбектің тармақталуы сияқты әртүрлі факторлармен өзгертілуі мүмкін [8]. Сондай-ақ толтырғыштар мен пластификаторлар сияқты модификаторларды осы қасиеттерді реттеу үшін пайдалануға болады. Температура, ығысу және қысым сияқты процесс параметрлерін оңтайландыру ағын сипаттамаларын басқаруға одан әрі көмектесе алады. Осылайша, табысты FDM өңдеу үшін қолданылатын материалдардың реологиялық сипаттамаларын терең түсіну қажет.

Процесс параметрлерін оңтайландыру ең аз ақаулары бар жоғары сапалы FDM бөлшектеріне қол жеткізу үшін өте маңызды. FDM процесі соңғы өнімнің сапасына әсер ететін әртүрлі параметрлерді қамтиды (1-кесте). FDM процесі термопластикалық жіптерді пайдаланатындықтан, саптама және экструдер температуралары жіптің балқуын бақылау үшін қолданылады. Растрдың бұрышы мен саңылауы материалды жұмыс алаңында қолдану қашықтығы мен бұрышын басқарады. Қабат биіктігі бөлшектердің биіктік рұқсатын анықтайды және ақаусыз өнімдерді қамтамасыз ету үшін маңызды. Толтыру тығыздығы толығымен тығыз өнімдерді жасау үшін 100%-дан прототиптеу және үлгіні бағалау үшін төмен тығыздықтарға дейін өзгеруі мүмкін.

FDM процесі және жоғарыда сипатталған параметрлер 3D және 4D басып шығару үшін әртүрлі жаңа полимерлік материалдармен қолданылған. 2-кестеде FDM жіптерін жасау үшін қолданылатын барлық термопластиктердің жалпы механикалық, жылулық және физикалық қасиеттері жинақталған. PEEK ең жоғары балқу температурасына (343 °C) және шыны өту температурасына (143 °C) ие. Бұл қасиеттер дәстүрлі FDM машиналарын пайдаланып PEEK бөліктерін басып шығару кезінде елеулі қиындықтар тудырады. Сонымен қатар, PEEK ең жоғары термиялық ауытқу температурасына (156°C) ие, бұл оны жоғары температуралы орталарда пайдалануға мүмкіндік береді. Екінші жағынан, ABS, PLA және басқа жиі қолданылатын FDM материалдарының балқу температурасы шамамен 200 ° C және FDM машиналарының көпшілігінде қолданылуы мүмкін. ABS сияқты аморфты полимерлер анық балқу температурасына ие емес; олар шыны ауысу температурасына жеткенде азырақ шыны тәрізді болады.

Полимер	Түр термопластикалық	Температура Балқу (°C)	Температура шыны ауысуы (°C)	Тығыздығы (г/см <sup>3</sup> )	Жылдамдық балқу (г/10 мин )
PLA [ 9 ]	Жартылай кристалды	152	59.1	1.24	6.1
ABS[1 0 ]	Аморфты	-	101	1.1	41
PVA[ 11 ]	Жартылай кристалды	175	58.4	1.23	17
PEEK[ 12 ]	Жартылай кристалды	343	143	1.3	-
PETG[ 13 ]	Аморфты	-	77.4	1.27	6.2
НЕЙЛОН [ 14 ]	Жартылай кристалды	188	55.1	1.14	6.2
PP[ 15 ]	Жартылай кристалды	131	-	0,89	20
PET [ 16 ]	Аморфты	-	71	1.33	16.3
ДК[ 17 ]	Аморфты	-	111	1.18	32
TPU [ 18 ]	Жартылай кристалды	217	-	1.22	15.9

FDM саласындағы заманауи зерттеулер мен әзірлемелер басып шығару сапасын, жылдамдығын жақсартуға және қолжетімді материалдардың ауқымын кеңейтуге бағытталған. Кейбір заманауи FDM принтерлерінде бір уақытта әртүрлі материалдармен басып шығаруға мүмкіндік беретін бірнеше экструдер бар. Бұл әртүрлі механикалық қасиеттері мен түс комбинациялары бар күрделі бұйымдарды жасаудың жаңа мүмкіндіктерін ашады. Жаңа FDM принтер үлгілерінде басып шығару дәлдігі мен жылдамдығын жақсарту үшін жетілдірілген жетек және экструзия жүйелері бар. Сызықтық бағыттауыштарды және одан да күшті қадамдық қозғалтқыштарды пайдалану басып шығару сапасын айтарлықтай жақсартады. Қазіргі заманғы FDM принтерлері күрделі геометрияларды жасау процесін жеңілдететін және басып шығаруға үлгілерді дайындауды тездететін компьютерлік дизайн және өндіріс (CAD/CAM) бағдарламалық жасақтамасымен жиі біріктірілген. Үлкен жұмыс көлемі бар FDM принтерлері пайда болды, бұл үлкен өлшемді өнімдерді бөлек бөліктерден құрастыруды қажет етпей басып шығаруға мүмкіндік береді. Бұл әсіресе құрылыс және автомобиль жасау сияқты салалар үшін маңызды.

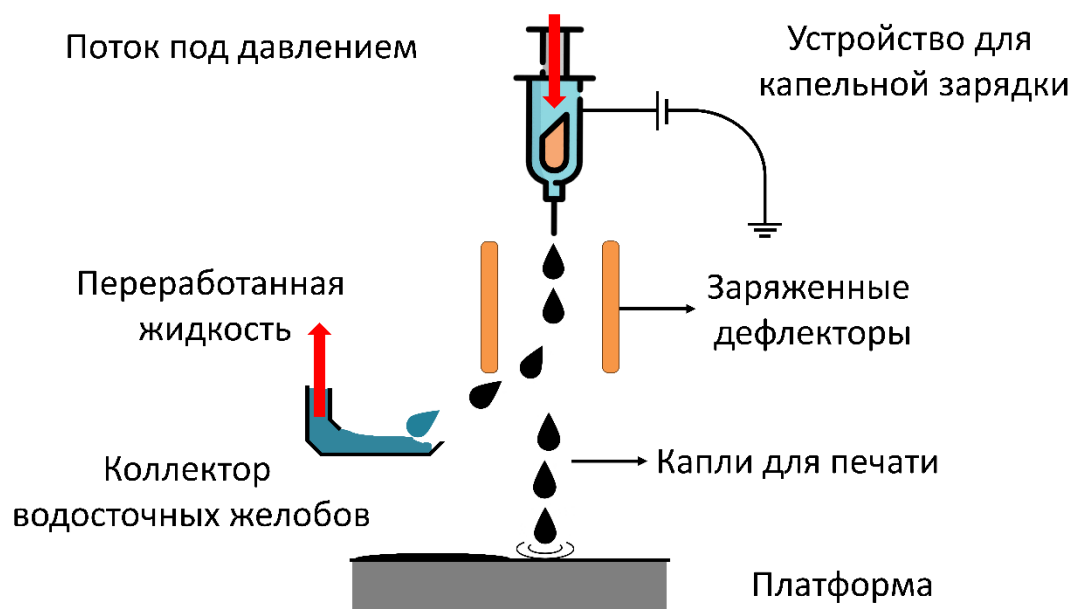
FDM жылдам прототиптеу және тұжырымдаманы сынау үшін кеңінен қолданылады. Бұл инженерлер мен дизайнерлерге идеяларды нақты нысандарға

тез аударуға және қажетті түзетулер енгізуге мүмкіндік береді. Медицина саласында FDM анатомиялық модельдерді, протездерді және арнайы медициналық құрылғыларды жасау үшін қолданылады. Мұндай модельдерді операцияларды жоспарлау және студенттерді оқыту үшін пайдалануға болады. Аэроғарыш өнеркәсібінде FDM жоғары жүктемелерге және экстремалды жұмыс жағдайларына төтеп бере алатын функционалдық бөлшектер мен компоненттерді өндіру үшін қолданылады. FDM принтерлері оқу орындарында студенттерге инженерлік және конструкторлық пәндерді оқыту үшін, сондай-ақ эксперименттік қондырғылар мен аспаптарды жасау үшін ғылыми зерттеулерде белсенді түрде қолданылады.

### **1.2.5 Сия бүріккіш модельдеу технологиясы**

Сия бүріккіш басып шығару технологиясы кескіндерді компьютерден сандық үлгілерге түрлендіреді, содан кейін сия бүріккіш принтер арқылы субстратқа сияны тікелей қолдана отырып, субстратта бастапқы кескінді шығарады. Дәстүрлі үлгіні басып шығару алдын ала дайындалған үлгілермен жұмыс істеуді қамтиды, ал сия бүріккіш технология қажетті дизайнды қалыптастыру үшін субстратқа көптеген ұсақ тамшыларды түсіреді. Нақты компьютерлік басқарудың арқасында бұл технология оңай жұмыс, жоғары дәлдік және жоғары жылдамдықтың артықшылықтарына ие. Бұл қазір үлгілерсіз цифрлық басып шығарудың маңызды технологиясы.

19 ғасырда физик Уильям Кельвин тамшылардың электростатикалық күштердің әсерінен ауытқуы туралы патент жариялады, бұл сия бүріккіш принтерлердің дамуына негіз болды. Сименс бұл патентті сия бүріккіш принтер жасау үшін 1950 жылдары ғана пайдаланды. Технология дамыған сайын сия бүріккіш принтерлердің өлшемі, құны және тамшы мөлшері үнемі азайып келеді. Материалтанудағы және химиялық синтездегі жылдам прогреске байланысты әртүрлі зерттеу мақсаттары үшін гидрогельдердің көбірек сорттары жасалуда. Сиялы басып шығару технологиясы қазіргі уақытта гидрогельдерді қолданудағы салыстырмалы түрде жаңа және күрделі әдіс болып табылады.



5-сурет – CIJ басып шығару принципінің схемалық көрінісі

Сия бүріккіш басып шығару үздіксіз сия бүріккіш басып шығару (CIJ) және сұраныс бойынша басып шығару (DOD) болып бөлінеді. CIJ процесінде сия принтер басының электродтарының әсерінен үздіксіз тамшыларды құрайды. Тамшылар құлаған кезде олар электр өрісінің әсерінен ауытқуы мүмкін, бұл басып шығару кезінде қажетсіз тамшыларды қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Әдетте, үздіксіз сия бүріккіш басып шығарудағы тамшылардың диаметрі басып шығару механизмінің өлшемінен үлкенірек болады. DOD-да тамшылардың пайда болу механизмі мұқият зерттеуге лайық.

Сұраныс бойынша басып шығаруды шамамен термиялық және пьезоэлектрлік деп бөлуге болады. Сұраныс бойынша термиялық басып шығару басып шығару процесінде көпіршіктерді жасауды талап етеді. Бұл сияға жоғары талаптар қояды және көбірек шектеулерге ие. Сондықтан пьезоэлектрлік сұраныс бойынша басып шығару қазір кеңірек зерттеліп, қолданылуда. Бұл техникада капиллярлы шыны түтік пен сақиналы пьезоэлектрлік элемент пьезоэлектрлік басып шығару механизмін құру үшін тығыз байланысты. Бастапқыда сия бүкіл капиллярлық шыны түтікті толтырып, оның шығуына жетеді және тепе-теңдікті сақтайды. Содан кейін пьезоэлектрлік материал электродтан кернеу сигналын алады. Ішкі және сыртқы электродтар арасында электр өрісі пайда болады, бұл пьезоэлектрлік элементтің радиалды кеңеюіне әкеледі. Пьезоэлектрлік элементке мықтап жалғанған шыны түтік те осындай өзгерісті бастан кешіріп, ішінде теріс қысым жасайды, бастапқы тепе-теңдікті бұзады. Нәтижесінде шыны түтіктің ішіндегі сия кері тартыла бастайды. Бұл әрекет аяқталғаннан кейін пьезоэлектрлік элемент пен капиллярлы шыны түтік жаңа кернеу сигналын алады, бұл олардың жиырылуын тудырады және сияны

түтіктен итереді. Осы жиырылу негізінде тағы бір кернеу сигналы енгізіліп, шыны түтік қайтадан кеңейіп, тамшылар түзу үшін сияны тартады.

Сияның қасиеттері сия бүріккіш басып шығару технологиясының негізгі факторларының бірі болып табылады. Сия басып шығару кезінде ағынның тұрақты болатын-болмайтынын анықтайды, зерттеу мақсаттары үшін қажетті тамшылардың мөлшері мен шығарылу сапасын анықтайды және спутниктік тамшылардың болуын анықтайды, осылайша басып шығарудың жалпы дәлдігіне әсер етеді. Рейнольдс саны ( $Re$ ), Вебер саны ( $We$ ) және Онзорж саны ( $Oh$ ) тамшылардың гидродинамикасын сипаттайтын маңызды өлшемсіз параметрлер болып табылады. Кішірек  $Re$  мәні тұтқыр күштердің үлкен әсерін көрсетеді, ал үлкен  $Re$  мәні инерцияның үлкен әсерін көрсетеді.  $We$  саны сұйықтық механикасында сұйықтықтың сыртқы күштердің әсерінен тамшылар немесе ағындар түзу қабілетін сипаттау үшін қолданылады. Вебер саны сұйықтықтың инерциялық күшінің оның беттік керілуіне қатынасы ретінде анықталады; оның мәні неғұрлым жоғары болса, сұйықтық тамшыларға емес, соғұрлым ағындарды қалыптастыруға бейім болады. Әдетте  $Z$   $Oh$ -тің кері шамасы ретінде қабылданады және ол құлдырау жылдамдығына тәуелді емес, ол  $Z=1/Oh$  түрінде көрсетіледі.  $1 < Z < 10$  диапазоны тұрақты тамшылардың түзілуін білдіреді.  $Z < 1$  болғанда, тұтқыр күштер тамшыны саптамадан шығаруды болдырмайды;  $Z > 10$  кезінде, әдетте, спутниктік тамшылар пайда болады.

$$Қайта = \frac{v\rho a}{\eta}$$

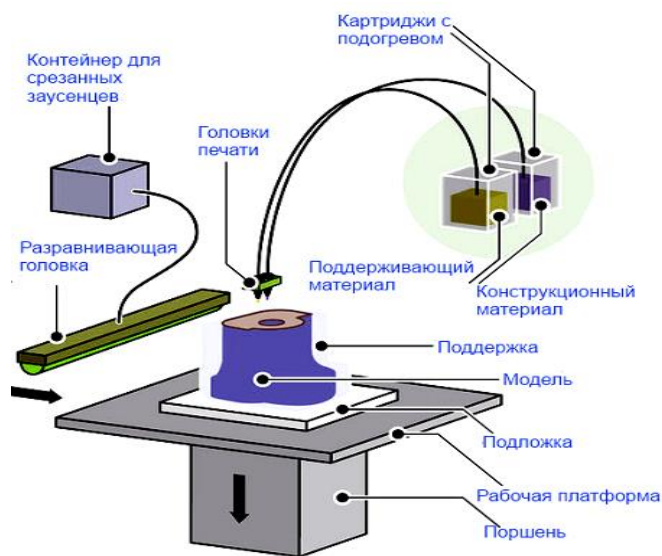
$$Біз = \frac{v^2\rho a}{\gamma}$$

$$Ой = \frac{\sqrt{We}}{Re} \frac{\sqrt{We}}{(\gamma\rho a)^{1/2}}$$

Теңдеуде  $Re$  Рейнольдс санын білдіреді,  $v$  – түсу жылдамдығы (м/с),  $\rho$  – сия тығыздығы (г/см<sup>3</sup>),  $a$  – саптама диаметрі (мкм),  $\eta$  – сия тұтқырлығы (мПа•с), Вебер санын белгілейміз, ал  $\gamma$  – сияның беттік керілуі (мН/м).  $Oh$  Ohnesorge нөмірін білдіреді. Сонымен қатар, сәйкесінше  $x$  және  $y$  осі ретінде  $Re$  және  $We$  пайдалану арқылы сия бүріккіш басып шығарудағы сия бүріккіш өнімділігін сипаттайтын анықтамалық диаграмма құруға болады.

Төмен бағамен жылдам прототиптеу және тапсырыстық өндіріс үшін сия бүріккіш технологияны пайдалану әлеуеті дәстүрлі өндіріс әдістеріне өте тартымды балама болып отыр. Байланыссыз басып шығару, жоғары басып шығару жылдамдығы және жоғары басып шығару дәлдігі сияқты артықшылықтары бар бұл технология қызу зерттеу тақырыбына айналуға және биосенсорларда, бөлшектерді тасымалдауда, дәрілік заттарды жүктеуде және киілетін құрылғыларда кеңінен қолданылады. Сия бүріккіш басып шығару

технологиясы басып шығару параметрлерінің қатарын реттеу, зерттеу мақсаттары үшін дәлдік пен тұрақтылықты қамтамасыз ету арқылы басылған сия тамшыларының өлшемін және шығару жылдамдығын басқара алады. Гидрогель, керісінше, әртүрлі зерттеу салаларында кеңінен қолданылатын материалдардың бірі болып табылады. Осы екі технологияның үйлесімі әртүрлі ғылыми салаларда практикалық артықшылықтар береді. Бұл технология одан әрі инновациялар мен әртүрлі зерттеу салаларында қолдануды уәде етеді.



5-сурет – Реактивті модельдеу технологиясы