



ИНЖЕНЕРИЯ ЖӘНЕ ИНЖЕНЕРЛІК ІС  
ИНЖЕНЕРИЯ И ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО  
ENGINEERING AND ENGINEERING

МАТЕРИАЛТАНУ  
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ  
MATERIAL SCIENCE

DOI 10.51885/1561-4212\_2025\_1\_83  
MFTAA 53.39.31

**Ә.С. Сағымбекова<sup>1</sup>, Е.А. Кожаметов<sup>2</sup>, Д.М. Аубакирова<sup>3</sup>**

Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

<sup>1</sup>E-mail: [esagymbekova@edu.ektu.kz](mailto:esagymbekova@edu.ektu.kz)\*

<sup>2</sup>E-mail: [ykozhakhmetov@edu.ektu.kz](mailto:ykozhakhmetov@edu.ektu.kz)

<sup>3</sup>E-mail: [danaqulbinom2023@gmail.com](mailto:danaqulbinom2023@gmail.com)

### ҰНТАҚТЫ МЕТАЛЛУРГИЯНЫҢ КОМБИНИРЛЕНГЕН ӘДІСТЕРІМЕН Ni-Ti-Cu ЖҮЙЕСІ НЕГІЗІНДЕ ПІШІНДІ ЕСТЕ САҚТАУ ҚАБІЛЕТІ БАР ҚОРЫТПАЛАРДЫ АЛУ

### ПОЛУЧЕНИЕ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Ni-Ti-Cu КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

### PRODUCTION OF SHAPE MEMORY ALLOYS BASED ON THE Ni-Ti-Cu SYSTEM BY COMBINED POWDER METALLURGY METHODS

**Аңдатпа.** Мақала Ni-Ti-Cu жүйесіне негізделген пішінді есте сақтау қабілеті бар (SMA) қорытпаларды алу үшін қолданылатын механосинтез және ұшқынды плазмалық қақтау (SPS) сияқты ұнтақты металлургияның заманауи әдістерін қарастыратын қысқаша шолу болып табылады. Пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпалар медицинадан аэроғарыш өнеркәсібіне дейін көптеген салаларда кеңінен қолданылады, өйткені олардың форманың серпімділігі мен пішінді есте сақтауы сияқты ерекше қасиеттері бар. Дәл осы бірегей SMA қасиеттері оларды алудың жаңа әдістерін, мысалы, ұшқынды плазмалық қақтау әдісін дамытуға қызығушылықты арттырады. NiTiCu қорытпаларының құрылымдық, механикалық және функционалдық сипаттамалары, сондай-ақ олардың басқа SMA-дан артықшылықтарына ерекше назар аударылады.

Жұмыста механосинтез кезеңдері, соның ішінде бастапқы ұнтақтарды таңдау, оларды механикалық активтеу және кейінгі өңдеу толықтай сипатталған. Алынған материалдардың жоғары тығыздығы мен біркелкілігін қамтамасыз ететін ұшқынды плазмалық қақтау процесі де қарастырылады. Өңдеу параметрлерінің қорытпалардың микроқұрылымына, сондай-ақ олардың фазалық түрленуіне және механикалық қасиеттеріне әсеріне ерекше назар аударылады.

Әдістердің артықшылықтары мен кемшіліктері, сондай-ақ қорытпалардың соңғы сипаттамаларына әсері талданады. Мақалада осы бағытты одан әрі дамыту перспективалары, сондай-ақ SPS көмегімен олардың синтездеу үрдістерін жетілдіру және пішінді есте сақтайтын жаңа қорытпаларды өзірлеу бойынша зерттеулер жүргізу талқыланады. Мақала жақсартылған қасиеттері мен кең қолдану мүмкіндіктері бар жаңа функционалды материалдарды жасау саласындағы болашақ өзірлемелерге негіз болады. Бұл материал ұнтақты металлургия, материалтану және пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпалар мәселелеріне қызығушылық танытатын оқытушыларға, докторанттарға, магистранттар мен студенттерге пайдалы болады.

**Түйін сөздер:** пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпалар, ұнтақты металлургия, ұшқынды плазмалық қақтау, Ni-Ti-Cu.

**Аннотация.** Статья представляет собой краткий обзор современных методов порошковой металлургии, таких как механосинтез и искровое плазменное спекание (SPS), используемых для

получения сплавов с памятью формы (SMA) на основе системы Ni-Ti-Cu. Сплавы с памятью формы широко используются во многих областях, от медицины до аэрокосмической промышленности, благодаря своим уникальным свойствам, таким как сверхупругость и память формы. Именно эти уникальные свойства SMA вызывают интерес к разработке новых методов их получения, таких как метод искрового плазменного спекания. Особое внимание уделяется структурным, механическим и функциональным характеристикам сплавов NiTiCu, а также их преимуществам перед другими SMA.

В работе подробно описываются этапы механосинтеза, включая выбор начальных порошков, их механическую активацию и последующую обработку. Также рассматривается процесс искрового плазменного спекания, который обеспечивает высокую плотность и однородность получаемых материалов. Особое внимание уделяется влиянию параметров обработки на микроструктуру сплавов, а также на их фазовые превращения и механические свойства.

Анализируются преимущества и недостатки методов, а также их влияние на конечные характеристики сплавов. В статье обсуждаются перспективы дальнейшего развития направления, а также проведения исследований по разработке новых сплавов с памятью формы и оптимизации процессов их синтеза с использованием SPS. Статья служит основой для будущих разработок в области создания новых функциональных материалов, обладающих улучшенными свойствами и широкими возможностями применения. Данный материал будет полезен преподавателям, докторантам, магистрантам и студентам, интересующимся вопросами порошковой металлургии, материаловедения и сплавов с памятью формы.

**Ключевые слова:** сплавы с памятью формы, порошковая металлургия, искровое плазменное спекание, Ni-Ti-Cu.

**Abstract.** The article provides a brief overview of modern powder metallurgy methods, such as mechanosynthesis and spark plasma sintering (SPS), used to produce shape memory alloys (SMA) based on the Ni-Ti-Cu system. Shape memory alloys are widely used in many fields, from medicine to the aerospace industry, due to their unique properties such as superelasticity and shape memory. It is these unique properties of SMA that arouse interest in the development of new methods for their production, such as the spark plasma sintering method. Special attention is paid to the structural, mechanical, and functional characteristics of Ni-Ti-Cu alloys, as well as their advantages over other SMAs.

The work describes in detail the stages of mechanosynthesis, including the selection of initial powders, their mechanical activation and subsequent processing. The spark plasma sintering process is also considered, which ensures high density and uniformity of the resulting materials. Special attention is paid to the influence of processing parameters on the microstructure of alloys, as well as on their phase transformations and mechanical properties.

The advantages and disadvantages of the methods are analyzed, as well as their effect on the final characteristics of alloys. The article discusses the prospects for further development of the field, as well as research on the development of new shape memory alloys and optimization of their synthesis processes using SPS. The article serves as a basis for future developments in the field of creating new functional materials with improved properties and wide application possibilities. This material will be useful for teachers, doctoral students, undergraduates and students interested in powder metallurgy, materials science and shape memory alloys.

**Keywords:** shape memory alloys, powder metallurgy, spark plasma sintering, Ni-Ti-Cu.

*Қысқашы.* Қазіргі әлем қарқынды дамып келеді және онда озық технологиялар үлкен рөл атқарады. Ғылыми-техникалық прогрестің негізгі бағыттарының бірі – әртүрлі салалардың өзекті мәселелерін шешуге қабілетті бірегей қасиеттері бар жаңа материалдар жасау. Пішін есте сақтау қабілеті бар қорытпаларды (SMA), атап айтқанда NiTiCu жүйелері инновациялық әзірлемелерге кең мүмкіндіктер ашатын феноменальды қасиеттері бар материалдардың перспективалық класы болып табылады. Алайда, бұл материалдарды алудың дәстүрлі әдістері, әдетте, ұзақ циклдармен және жоғары өндеу температураларымен сипатталады, бұл олардың кең қолданылуын шектейді. Осыған байланысты процесті оптималдауға және SMA сипаттамаларын жақсартуға мүмкіндік беретін инновациялық әдістерді әзірлеу және енгізу қажеттілігі туындайды. Осындай тәсілдердің бірі ұнтақты металлургия әдістерін, атап айтқанда механосинтезді және ұшқынды плазмалық қақтауды біріктіру болып табылады.

Ұнтақты материалдарға механикалық әсер ету процесі болып табылатын

механосинтез біртекті микроқұрылымдардың пайда болуына және қорытпалардың қасиеттерін жақсартуға ықпал етеді. Ұшқынды плазмалық қақтау өз кезегінде жоғары тығыздыққа қол жеткізуге және қақтау процесін жылдам қыздыру және тиімді басқару арқылы дайын өнім құрылымындағы ақауларды азайтуға мүмкіндік береді. Бұл әдістерді біріктіру олардың микроқұрылымы мен функционалдық қасиеттерін бақылаудың жоғары дәрежесін қамтамасыз ететін Ni-Ti-Cu жүйесіне негізделген пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаларды жасаудың жаңа мүмкіндіктерін ашады.

Мақалада Ni-Ti-Cu негізіндегі SMA алу үшін механосинтез бен ұшқынды плазмалық қақтауды қолданудың негізгі аспектілері қарастырылады.

*NiTiCu жүйесі негізінде пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпалардағы деформация және пішінді қалпына келтіру механизмдерін зерттеу.* Пішінді есте сақтау – бұл кейбір металл және полимерлі материалдардың бірегей қасиеті, олар термиялық немесе механикалық күш қолданылған кезде деформациядан кейін (температура немесе кернеу жағдайында) бастапқы пішінін (бағдарламаланған пішінін) қалпына келтіре алады. Пішінді есте сақтау материалдарының бұл қабілеті оларды датчиктер мен орындау механизмдері, интеллектуалды құрылымдар, биомедициналық имплантаттар және аэроғарыштық компоненттер сияқты әртүрлі инженерлік қосымшаларда функционалды материалдар ретінде пайдалануға мүмкіндік береді (Chekotu et al., 2019).

Нитинол (никель-титан қорытпасы) – CuZnAl және CuAlNi сияқты басқа жалпы қорытпалармен бірге ең көп қолданылатын пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпа. Сынғыш интерметаллидтердің көпшілігінен айырмашылығы NiTi табиғаты бойынша пластикалық болып табылады, сондықтан жиі таңдалады (Chekotu et al., 2019).

Болаттағы мартенсит ашылғаннан кейін адамдар әртүрлі материалдардың мартенситтік түрленуі бойынша зерттеулер бастады. 1932 жылы AuCd қорытпаларында мартенситтік конверсияның кері конверсиясы табылды. Осы құбылыстың арқасында материалдар механикалық деформацияларға дейін бастапқы пішіні мен өлшемін ала алды және пішінді есте сақтау қабілеті (SME) және пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпалар (SMA) тұжырымдамасы жасалды. Алғашқы пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаны Arne Olander 1932 жылы ашқанымен, нитинолды Buheler мен Wiley 1960 жылы Naval Ordnance зертханасында алғашқылардың бірі болып алып, SMA-ның нақты қолданылу аясын кеңейтті. Атап айтқанда, оның экономикалық тиімділігі және жұмыс температурасының қолайлы диапазонына (әдетте  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  аралығында) арналған пішін жадына байланысты болды. Бұрын өнімді өндіру үшін сұйық металлургия әдісі қолданылған. Бірақ бірнеше онжылдықтардан кейін ұнтақты металлургия және қосымша өндіріс процестері басым болды. NiTi фазасы мартенситті аустенитке және керісінше айналдыруға қабілетті NiTi қорытпаларындағы жалғыз жауапты фаза. Жоғары жұмыс температурасында термиялық индукцияланған SME мүмкін емес, өйткені ол мартенсит аустенитке айналуы мүмкін болған кезде ғана жұмыс істейді. Аустенитті әрлеу температурасынан асатын жұмыс температуралары кернеуден туындаған SME-ін ғана көрсете алады (S. Kumar Patel, B. Swain, R. Roshan et al., 2020).

Пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпалар (SMA) – пішінін деформацияланғаннан соң деформацияланбаған қалпына келтіре алатын материалдар. Бұл материалдағы мартенсит-аустениттік өзгеруге байланысты. Бұл құбылыс термиялық индукцияланған пішінді есте сақтау эффектісі (SME) деп аталады. Сонымен қатар, бұл түрлендіру салқындалу жүйесі жоқ жоғары жұмыс температурасында жүреді. Бұл құбылыс стресс-индукцияланған пішінді қалпына келтіру болып табылады және стресс-индукцияланған пішінді есте сақтау қабілеті деп аталады (сонымен қатар аса-серпімділік немесе жалған-серпімділік деп аталады).

1890 жылдары Адольф Мартенс болатта мартенситтің пайда болуын анықтады. Бұл тарихтағы термиялық әсерге негізделген форманың есте сақтау әсерін жасауға бағытталған

үлкен қадам болды. Fe-C жүйесінде аустениттің мартенситке айналуы қайтымсыз (S. Kumar Patel, B. Swain, R. Roshan et al., 2020). 1958 жылға дейін CuZn және InTi сияқты басқа қорытпалар табылды. 1961 жылы АҚШ-тағы әскери-теңіз артиллериялық зертханасында NiTi SMA кездейсоқ табылды. Олар NiTi-ның ыстыққа төзімділігі мен коррозияға төзімділігін зерттеді. Зертхананың атауына (Naval Ordnance Laboratory) сүйене отырып, ол NiTiNOL деген атпен танымал болды. Алғашқы төрт әріп сәйкесінше Ni және Ti болып табылады. Қалған әріптер ол табылған зертхананың атауын білдіреді. Нитинол өзінің экономикалық тиімділігіне, қол жетімділігіне және пішінді есте сақтаудың жақсы әсеріне байланысты зерттеу қауымдастығының үлкен назарын аударды және қолдану үшін озық материалдар нарығында үстемдік етті.

1965 жылы Бюлер мен Ванг ашқан нитинол 50 атомдық процент (55 салмақ проценті) Ni, ал қалғаны Ti бар тең атомды металлалық қосылыс болып табылады. Алайда, қазіргі нитинол қорытпалары осы элементтерге негізделген екілік композициялардың кең спектрін қамтиды (Kubářová et al., 2024).

Ғылым мен техниканың жетістіктері әртүрлі салаларда нитинол негізіндегі қорытпаларды кеңінен енгізуге әкелді. Нитинол пішінді есте сақтау қабілеті (SME) және суперикемділіктен (SE) басқа, никель иондарының ықтимал бөлінуіне қатысты алаңдаушылыққа қарамастан, керемет биоүйлесімділікті көрсетеді. Оның коррозияға төзімділігі 300 сериялы тот баспайтын болаттан және титан қорытпаларынан кем түспейді және оны қорғаныс қабаттарын құрайтын бетті өңдеу арқылы одан әрі арттыруға болады. Сонымен қатар, нитинол адам ағзасының ортасында жоғары тозуға төзімділікті көрсетеді. Осы сипаттамалардың үйлесімі оны медициналық құрылғыларға өте қолайлы етеді, бұл оның биомедицинада кеңінен қолданылуына ықпал етеді. Нитинолдың алғашқы медициналық қолданылуы 1970 жылдары өте серпімді нитинол брекetterінен пайда болды. Содан бері оның ауқымы кеңейіп, қазір әртүрлі медициналық құрылғыларды, соның ішінде стенттерді, экстракторларды, жасанды жүрек клапандарын, констрикторлық бекіткіштерді, шегелер мен пластиналарды қамтиды. Дегенмен, қазіргі қолданбалар көбінесе қарапайым пішіндер мен кішірек өнім өлшемдерін қамтиды (Kubářová et al., 2024).

Пішінді есте сақтау қабілеті бар никель-титан қорытпалары (Wen et al., 2021) пішінді есте сақтау эффектісіне, шамадан тыс серпімді әсерге, демпферлік қасиеттерге, биоүйлесімділікке және коррозияға төзімділікке ие, олар аэроғарыштық, биомедициналық, автомобильдік, құрылыс және икемді электроникада кеңінен қолданылады.

Осылайша, Ni-Ti қорытпаларынан жасалған кеуекті құрылымдар энергияны сіңірудің тамаша қабілетіне, жоғары демпферге, жоғары меншікті беріктікке және жеңілдік үшін биоүйлесімділікке ие, олар әдетте діріл сөндіргіштер, биологиялық сүйек импланттары, микро діріл тосқауылдары және смарт жетектер сияқты функционалды бөлшектер үшін пайдаланылады (Tang et al., 2023).

Ti-Ni негізіндегі қорытпалар жеткілікті пластикалық екені белгілі, оларды белгілі жағдайларда 60 % суық өңдеуге болады, бірақ олар металлалық қосылыстардың бір түрі болып табылады. Алайда, Cu 12,5 ат.%-дан асатын Ti-Ni-Cu қорытпалары сынғыш әрі пластикалық деформацияланбайды. (Pорова et al., 2020) пластиналық құрылымдардың пайда болуы сынғыштыққа әкелуі мүмкін деп хабарлады. Сондықтан, Ti-Ni-Cu қорытпалары Ti-Ni екілік қорытпаларымен салыстырғанда жоғары пішінді есте сақтау әсерінің көрсеткіштері мен жылу және кернеулі гистерезистің төмендеуіне байланысты үлкен назар аударғанымен, олардың нашар өнімділігі Ti-Ni-Cu пішінді есте сақтау қорытпаларының практикалық қолданылуын тежейді. Соңғы жылдары балқыманы иіру әдістері олардың ішкі өңдеу шектеулерін болдырмау үшін мыс мөлшері жоғары Ti-Ni-Cu қорытпаларын жасау үшін қолданылады. Сондай-ақ, Ti-Ni-Cu қорытпасынан жасалған ленталар қалыпты құюдан жасалған қорытпалармен салыстырғанда жоғары пішінді есте

сақтау сипаттамаларына және супер серпімділікке ие екендігі туралы хабарланды. Дегенмен, таспалардың қалыңдығы мен пішініне қатысты шектеулер бар. Әдетте балқытылған таспалардың қалыңдығы 15-40 мкм, ал олардың пішіні әдетте жұқа және тегіс (Popova et al., 2020).

10 ат.% дейін концентрациясы бар Ti-Ni-Cu пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаларында Cu мартенситтік түрленуі (MT) екі сатылы процесс болып табылады, яғни B2 $\leftrightarrow$ B19 (орторомбиялық) түрлендіруден кейін B19 $\leftrightarrow$ B19' (моноклиндік) түрлендіру жүреді, ал құрамында Cu 10 ат.%-дан астам қорытпалар B19 мартенситке бір сатылы түрлендіру арқылы айналады. Бұл модельдер атқарушы жүйелердің жауап беру уақытын арттыра алатын тар гистерезисіне байланысты SMA жетектері үшін үлкен қызығушылық тудырады. Алайда, 10 ат.%-тен асатын Cu қосу қорытпаның қалыптылығын бұзады, деформация қадамдарынсыз технологияны қажет етеді (Cirstea et al., 2021).

*Ni-Ti-Cu пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаларды өндіруге арналған ұнтақты металлургияның мүмкіндіктері.* Кең ауқымда қолданылатын TiNi қорытпаларын алу үшін әртүрлі әдістер бар. Өндірістің жалпы қабылданған және коммерциялық мақұлданған әдістерінің бірі – құю әдісі. Дегенмен, бұл дәстүрлі әдіс соңғы өнімді алғанға дейін балқу, құю және кейінгі өңдеу кезеңдерінен өтетін көп сатылы процесс (Samal et al., 2021). Балқу микро және макробөлшектерге әкелуі мүмкін, бұл өңдеу процесінде элементтік құрамның химиялық гетерогенділігіне және тотығуына әкелуі мүмкін. Бұл соңғы өнімдегі қоспалардың көбеюіне әкелуі мүмкін. Кейінгі өңдеу кезеңі деформацияға төзімді болуы мүмкін NiTi қорытпасының қатаюына әкеледі.

Нитинол қорытпалары титанның жоғары тосындылығына және өте төмен өңделуіне байланысты жасау және өңдеу қиын. Дәстүрлі өңдеу әдістері, соның ішінде құю және ұнтақ металлургиясы нитинолды өңдеуде бірқатар мәселелерге ие. Бұл мәселелерді келесідей қорытындылауға болады (S. Kumar Patel, B. Swain, R. Roshan et al., 2020):

- Біртекті құрамға қол жеткізу;
- Күрделі геометриялық пішіндерді жасау;
- Өңдеудің төмен деңгейі (жоғары икемділік және Ni-Ti абразивтілігі);
- Сапалы Ni-Ti ұнтағын сатып алу (оксидтер мен қоспалар жоқ);
- Инертті атмосфераны қамтамасыз ету (тотығуды болдырмау үшін);
- Қоспалардың болмауы (трансформация температурасына және жарықтардың таралуына әсер етеді);
- Ақаулар мен қажетсіз кеуектіліктің алдын алу (жүктемені азайтады, жарықтардың пайда болуын/таралуын бастайды).

Алайда, Ni-Ti қорытпасының жоғары икемділігі, қалпына келтіру әсері және деформацияны күшейтетін қасиеттері никель-титан қорытпасынан жоғары сапалы және жоғары дәлдіктегі бөлшектерді өңдеуді өте қиын етеді. Сонымен қатар, токарлық және фрезерлік өңдеу, соғу және құю арқылы күрделі құрылымы бар Ni-Ti қорытпасынан бөлшектер жасау қиын, бұл оның қолданылуын айтарлықтай шектейді. Сондықтан Ni-Ti қорытпасын күрделі құрылымға дейін кеңейтуді және оның өнімділігін одан әрі жақсартуды жүзеге асыру үшін Ni-Ti қорытпасын қалыптаудың жаңа технологиясын іздеу қажет.

Стандартты NiTi қорытпаларын өндірудегі бұл кедергілер мен шектеулер зерттеушілерді NiTi қорытпаларын өндірудің басқа, қарапайым, уақытты үнемдейтін және тиімді әдістерін табуға мәжбүр етті.

Жақында зерттеушілер NiTi қорытпаларын алудың альтернативті әдістеріне назар аударды. Ұнтақты металлургия (PM) – бұл престоу мен қақтаудың кешенді процесі. PM ұнтақ материалдарын қолдана отырып, дәстүрлі құю әдістерімен байланысты мәселелерді шешу үшін жасалған. PM технологиясы химиялық біртексіздікті

болдырмайтын және соңғы өнімді алудың бір сатылы процесін қамтамасыз ететін фазалық бөлінусіз оттегі мен көміртегі сияқты қоспалардың минималды мөлшерін қамтамасыз етеді. РМ әдісімен NiTi қорытпаларынан жасалған бөлшектер жұқа және біркелкі микроқұрылымның арқасында жақсы физикалық және механикалық қасиеттерге ие. Алайда, шектеулердің бірі РМ арқылы күрделі пішінді бөлшектерді жасау мүмкіндігі төмен (Samal et al., 2021).

Ұнтақты металлургия – бұл сынғыш Ti–Ni–Cu қорытпаларының бөлшектерін алудың перспективті әдісі, өйткені ол қымбат өндеуді, термомеханикалық өндеуді және соған байланысты материалдардың жоғалуын болдырмайды немесе азайтады.

Басқа материалдарды қосу арқылы мақсатты құрылымның механикалық қасиеттерін жақсарту ең кең таралған әдістердің бірі болып табылады. Ni-Ti кеуекті құрылымдарын алу үшін өздігінен таралатын жоғары температуралы синтезді қолданды және Ni-Ti кеуекті құрылымдарының макроқұрылымына, микроқұрылымына және механикалық қасиеттеріне алюминий қоспасының әсерін зерттеді (Monogenov et al., 2022).

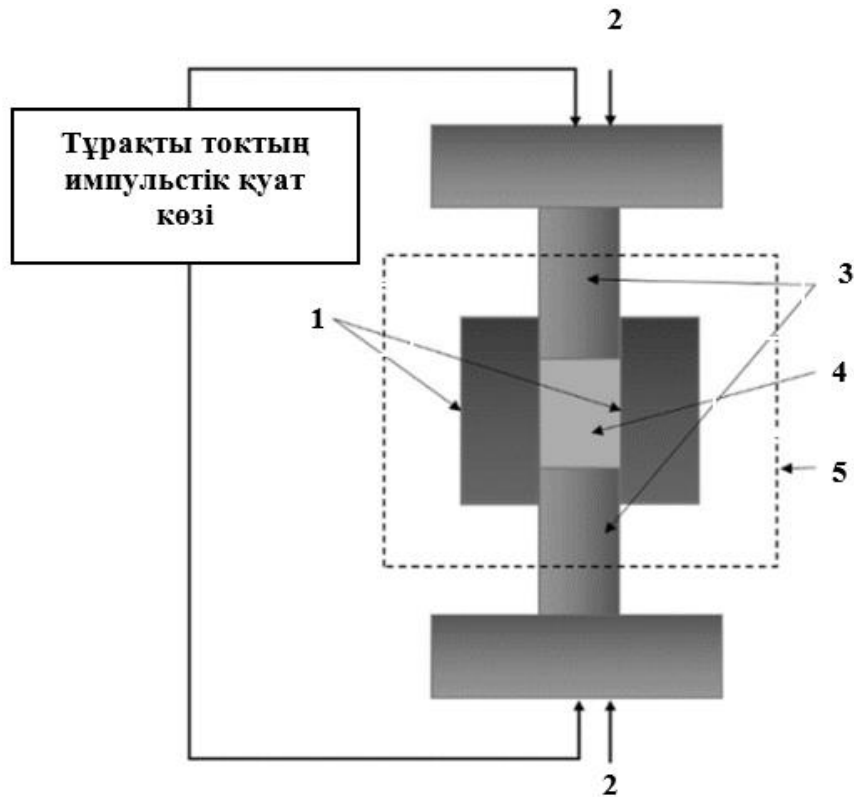
Cu қоспаларының әртүрлі концентрациясы бар Ni-Ti негізіндегі кеуекті қорытпалардың физика-механикалық қасиеттерін зерттеді. Зерттеу көрсеткендей, Cu қоспалары Ni-Ti қорытпаларының қасиеттерін күшейтеді (Kaftaranova et al., 2022).

Сонымен қатар, (Bewerse et al., 2015) толығымен өзара байланысты үш өлшемді микроарналары бар кеуекті Ni-Ti құрылымдарын алу үшін болат сымды кеңістіктік тірек ретінде пайдалануды көздейтін ұнтақ металлургия әдісін қолданды. Бұл әдіс микроарналардың көлемдік үлесін дәл бақылауға мүмкіндік береді. Зерттеушілер оңтайландырылған өндеу пішінді жады қасиеттерін тудырғанын байқады, бұл дизайнды энергияны сіңіруге немесе дискілерде қолдануға өте қолайлы етеді. Бұл зерттеу жеке қасиеттері бар инновациялық азот нитридті кеуекті құрылымдарды жасау үшін осы тәсілдің әлеуетін көрсетеді. Дегенмен, осы материалдардың осы салалардағы әлеуетін толық зерттеу және кеңейту үшін қосымша зерттеулер қажет.

*NiTiCu жүйесі негізінде SMA алу кезінде ұшқынды плазмалық қақтау (SPS) технологиясын қолданудың артықшылықтары мен ерекшеліктері.* Ұнтақты металлургияның әртүрлі әдістері бар, мысалы, кәдімгі қақтау (CS), өздігінен таралатын жоғары температуралы синтез (SHS), қысымда металл құю (MIM), ыстық изостатикалық престеу (HIP), ұшқынды плазмалық қақтау (SPS), плазмалық балқу, микротолқынды қақтау әдістері (MWS). Барлық осы қақтау процестерінің ішінде ұшқынды плазмалық қақтау әдісі реакция процесінің қысқа уақытымен ерекшеленеді. SPS процесі 900-ден 1100 °C-қа дейінгі төмен қақтау температурасында жүзеге асырылуы мүмкін, бұл біркелкі қақталуды қамтамасыз етеді және қажетсіз реакция өнімдері мен жоғары қыздыру жылдамдығын болдырмайды, сонымен қатар жанама өнімдердің жоғары консолидациясын қамтамасыз етеді.

Жалғыз шектеу – бұл процесс күрделі пішінді материалдарды алуға мүмкіндік бермейді. Ұшқынды плазмалық қақтау (SPS) – ұнтақтарды тығыздау үшін қысым мен импульстік тұрақты ток бір уақытта қолданылатын қақтаудың жаңа әдісі (Bewerse et al., 2015). SPS – ұнтақтарды тығыздау үшін тұрақты токтың электрлік импульстары мен бір осьтік қысымды қолданатын әдіс. Қысымды қолданумен бір мезгілде жүктеме қақтау процесінің қосымша қозғаушы күші ретінде әрекет етеді, бұл қақталған қорытпалардың тығыздығы мен түйіршіктілігінің жоғарылауына әкеледі. Зерттеушілер бұған дейін NiTi қорытпаларының соңғы микроқұрылымы мен тығыздауында маңызды рөл атқаратын қақтау уақыты мен температурасы және жүктеме мөлшері сияқты өндеу параметрлерін зерттеген. Қақтау температурасы тығыздау механизмдерінде, микроқұрылым эволюциясында және ұшқынды плазмалық қақталған қорытпаның механикалық қасиеттерінде маңызды рөл атқарады. Бөлшектердің қайта орналасуы, локализацияланған деформация және көлемдік деформация тығыздау үшін қолданылатын ұнтақ бөлшектерінің өлшем

диапазонына негізделген қақтау механизмінің тізбегі болып көрінеді. Бқшамды қақталған қорытпаның беріктігі микротүйіршіктердің орналасуымен анықталатын микроқұрылымға байланысты (Samal et al., 2021). Ұшқынды плазмалық қақтау (SPS) қондырғысының схемасы 1-суретте көрсетілген.



**1-сурет.** SPS қондырғысының схемалық көрінісі: 1 – штамп, 2 – қысым, 3 – поршень, 4 – ұсақталған ұнтақ, 5 – вакуумды камера

*Ескерту – авторлармен (Bahador, 2017) негізінде құрастырылған*

SPS процесінде графит матрицасы стандартты қақтау материалы ретінде қолданылады. Алайда, жақында аустенитті болат графитті алмастыра алатын жаңа материалға айналды. Демек, бұл материалдардан жылу шығынын азайтып, қақталған жанама өнімде жоғары тығыздыққа қол жеткізе алады. Нәтижесінде қақтау процесі уақыты мен температурасы аз әрі функционалды болды, бұл құрылымның біртектілігіне әкелуі мүмкін. NiTi қорытпалары саласындағы SPS процесі негізінен қақталған NiTi қорытпаларының микроқұрылымдық эволюциясы бар тығыздау аймағындағы шығуды қамтиды. Дегенмен, NiTi қорытпалары пішінді есте сақтау қабілетінің функционалдық қасиеттері тұрғысынан көбірек қолданылады. NiTi ұшқынды плазмалық қақталған қорытпаларының SME қасиеттері іс жүзінде талқыланды. Кейбір зерттеушілер қысу кернеуі мен индукцияланған пластикалық деформация кезінде механикалық қасиеттерді бағалауға көшті. Дегенмен, әлі күнге дейін түйіршіктердің таралуы тұрғысынан қақталған қорытпаның SME әсерін талдау бойынша зерттеулер жетіспейді. Кейбір мақалаларда бұл қорытпа туралы айтылғанымен, қорытпалардың пішіні мен функционалдық қасиеттерін есте сақтау әрекетін зерттеуге арналған басылымдар аз немесе мүлдем жоқ.

Импульстік токтың рөлі плазма мен джоульдік қыздыру әсерін жасау болып табылады,

бұл қақтау кезінде ұнтақтардың байланысуына және қатаюына ықпал етуі мүмкін. Осылайша, SPS басқа дәстүрлі қақтау процестерімен алу қиын материалдарды жылдам жасаудың артықшылығына ие. Дегенмен, SPS ұнтағын біріктіру кезінде плазмалық ұшқындардың болуы және қақтау механизмі туралы ортақ тұжырым жоқ. Дегенмен, джоульдік қыздырудың ұнтақтың жанасу аймақтарында локализацияланған жылуды бастауға және қатты күйдегі диффузияға әсерін зерттеушілер кеңінен мойындайды. (Cirstea et al., 2024) қақтау процесінде эксперименттік демонстрация жасау арқылы ұшқынды плазманы алу мүмкіндігіне күмән келтірді. (Zhang et al., 2014) жоғары температуралы ұшқынды плазманың пайда болғанын хабарлады. Олар ұшқынды плазма тұрақты ток импульсін қосу-өшіру басында ұнтақ бөлшектері арасындағы электр разрядының әсерінен саңылауларда пайда болуы мүмкін деп болжады. Сонымен қатар, қысқа уақыт ішінде тиімді қақтау процесі үшін келесі факторлардың жиынтығы қажет: ұшқынды разряд, джоульдік қыздыру, электрлік диффузия және пластикалық деформация. SPS ұнтақ металлургиясында көптеген металл ұнтақтарын алу үшін, соның ішінде Ti–Ni негізіндегі SMA жасау үшін қолданылады, бірақ Ti–Ni SMA пішінінің қасиеттеріне қайталама процестердің әсері туралы шектеулі зерттеулер бар. Осылайша, бұл зерттеуде ұшқынды плазмалық қақталған Ti–51% Ni SMA деформациясы үшін еркін соғу (ашық штамптау) деп аталатын қайталама процесс қолданылды және нәтиже микроқұрылым мен аса серпімділік тұрғысынан еркін соғусыз өңделген үлгімен (өңделмеген үлгі) салыстырылды.

Бөлшектердің мөлшері мен термостаттау температурасын зерттеу NiTi қорытпаларын қақтауда маңызды рөл атқарады. Жақында NiTi пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаларын жеңілдету үшін өздігінен таралатын жоғары температуралы синтез, микротолқынды қақтау, қысымда металды құю, кәдімгі қақтау және таңдамалы лазерлік балқыту сияқты ұнтақты металлургияның әртүрлі әдістері қолданылды. Өндірілген материалдар үшін алынған соңғы тығыздық қақтау процесінің тиімділігін анықтайды. SPS материалдарды төмен температурада қысқа уақыт ішінде толық тығыздыққа дейін қақтау үшін қолданылған. Бөлшектердің беттері арасындағы тиімді байланыс арқылы SPS процесінде материалдардың жоғары тығыздығына қол жеткізуге болады. SPS кезінде жүктемені қолдану арқылы булану және балку бөлшектер арасындағы тиімді байланысқа әкелді. SPS процесі кезінде жылу графит соққысы мен матрицалар арқылы импульстік ток ағынымен және ақырында ұнтақ бөлшектерімен пайда болады. Осылайша, ұнтақ бөлшектері арасында разряд пайда болуы мүмкін, бұл бөлшектердің жанасу беттерінде жоғары температураның пайда болуына әкеліп соғады, нәтижесінде жергілікті балку пайда болады. Мойындар (necks) ұнтақ бөлшектерінің арасында пайда болды, өйткені балқытылған аймақтар бір-біріне жабысып, беттерге жылуды жылдам беру арқылы қатайды. Қақтау температурасы белгілі бір уақыт аралығында біркелкі сыртқы қысыммен сақталатындықтан, диффузия түйіршіктердің бетінде және шекарасында жүреді. Осылайша, жоғары тығыздалған өнімді SPS процесі арқылы вакуумды доғалық балқыту, вакуумды индукциялық балқыту және микротолқынды қақтау сияқты басқа дәстүрлі қақтау әдістерімен салыстырғанда қысқа уақыт ішінде алуға болады (C. Velmurugan et al., 2018).

Қысым, температура, уақыт, импульстік ток және кернеу сияқты SPS параметрлері қақталған өнімдердің механикалық және микроқұрылымдық сипаттамаларына әсер етеді. Бөлшектердің мөлшерінің, қысымының және қақтау температурасының мыс ұнтағының тығыздағышына әсерін бағалау мақсатында жүргізілген ертерек жүргізілген зерттеу тығыздауға негізінен бөлшектердің мөлшері мен қақтау температурасы әсер ететіндігін анықтады. SPS әдісіндегі ұнтақ бөлшектерінің мөлшері деформацияға, бөлшектердің нақты бетіне, жергілікті қысымға және ток күшіне байланысты болды. Қақтау темпера-



турасы 1000-нан 1100 °C-қа дейін көтерілгенде, SPS арқылы алынған Ti қорытпасының тығыздығы 97-ден 99 %-ке дейін артатыны анықталды. Сол сияқты, SPS әдісімен өңделген вольфрам ұнтағының салыстырмалы тығыздығы 81 %-тен 95 %-ке дейін ұлғайтылды, қақтау температурасы 1600-ден 1800 °C-қа дейін көтерілді. NiTi-де аустениттің (B2) қажетті фазасының түзілуі қақтау температурасының жоғарылауымен және Ni<sub>3</sub>Ti және Ti<sub>2</sub>Ni сияқты қажетсіз қайталама фазалардың азаюымен жоғарылауы мүмкін (Velmurugan et al., 2018). Осылайша, қақтау температурасы мен бөлшектердің мөлшері SPS әдісімен қақталған өнімнің тығыздығы мен микроқұрылымына айтарлықтай әсер етеді.

*Қорытынды.* Механосинтез және ұшқынды плазмалық қақтау сияқты ұнтақты металлургия әдістері Ni-Ti-Cu жүйесіне негізделген пішінді есте сақтау қорытпаларын алудың перспективалы технологиялары болып табылады.

Механосинтез біртекті микроқұрылымды қалыптастыруға және қорытпалардың беріктігін арттыруға ықпал ете отырып, жақсартылған қасиеттері бар нанокұрылымды ұнтақтарды алуға мүмкіндік береді.

Ұшқынды плазмалық қақтау ұнтақтардың салыстырмалы түрде төмен температурада тез және тиімді қақтауды қамтамасыз етеді, өңдеу уақыты мен энергия шығынын азайтады. Сонымен қатар, бұл әдіс жоғары тығыздықтағы және жақсартылған механикалық қасиеттері бар өнімдерді алуға мүмкіндік береді.

Механосинтез бен ұшқынды плазмалық қақтау үйлесімі бақыланатын қасиеттері бар Ni-Ti-Cu жүйесіне негізделген жоғары сапалы пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаларын алуға мүмкіндік береді, соның ішінде: жоғары пішінді қалпына келтіру жылдамдығы, бақыланатын пішінді есте сақтау қабілеті, жоғары беріктік пен икемділік, коррозияға төзімділік, жақсартылған биоүйлесімділік.

Ұнтақты металлургия әдістері, әсіресе механосинтез бен ұшқынды плазмалық қақтау үйлесімінде, Ni-Ti-Cu жүйесіне негізделген жоғары сапалы пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаларды алудың жаңа мүмкіндіктерін ашады деп айтуға болады.

*Мүдделер қақтығысы.* Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

*Алғыс.* Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (№ AR22682739 – «NiTiCu жүйесі негізінде пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаларды өндіру технологиясын әзірлеу»).

*Ғылыми мақаланы жазу процесінде генеративті ЖИ және оның көмегімен технологияны қолдану туралы хабарлама.* Бұл жұмысты дайындау кезінде авторлар генеративті ЖИ қолданбады.

#### Әдебиеттер тізімі

- Chekotu, J.C.; Groarke, R.; O'Toole, K.; Brabazon, D. Advances in Selective Laser Melting of Nitinol Shape Memory Alloy Part Production. *Materials* 2019, 12, 809. <https://doi.org/10.3390/ma12050809>
- S. Kumar Patel, B. Swain, R. Roshan et al. A brief review of shape memory effects and fabrication processes of NiTi shape memory alloys, *Materials Today: Proceedings* 2020, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.539>
- Kubášová, K.; Drátovská, V.; Losertová, M.; Salvetr, P.; Kopelent, M.; Kořínek, F.; Havlas, V.; Džugan, J.; Daniel, M. A Review on Additive Manufacturing Methods for NiTi Shape Memory Alloy Production. *Materials* 2024, 17, 1248. <https://doi.org/10.3390/ma17061248>
- Wen, S.; Gan, J.; Li, F.; Zhou, Y.; Yan, C.; Shi, Y. Research Status and Prospect of Additive Manufactured Nickel-Titanium Shape Memory Alloys. *Materials* 2021, 14, 4496. <https://doi.org/10.3390/ma14164496>
- Tang, D.; Hu, Y.; Yang, L. New Insights into the Mechanical Properties, Functional Fatigue, and Structural Fatigue of Ni-Ti Alloy Porous Structures. *Metals* 2023, 13, 931. <https://doi.org/10.3390/met13050931>
- Structure and phase composition of ferritic perlitic steel surface after electrolytic plasma quenching, *Russian Physics Journal*. – 2020. – Vol.63. – No.5. – P. 791-796. DOI:10.1007/s11182-020-02099-z, Popova

- N.A., Nikonenko E.L, Tabieva E.E., Uazyrkhanova G.K  
Influence of surface quenching on morphology and phase composition of ferritic-pearlitic steel, *Izvestiya Ferrous Metallurgy*. – 2020. – Volume 63. – No.11-12. – P. 915–921. DOI:0.17073/0368-0797-2020-11-12-915-921, Popova, N.A., Nikonenko, E.L., Tabieva E.E., Uazyrkhanova, G.K., Gromov, V.E.  
Studies about structural and thermal investigations on  $Ti_{50}Ni_{30}Cu_{20}$  alloys obtained by different technological processes. – 2021. C.D. Cirstea, M. Lucaci, M. Valeanu, M. Sofronie, L.G. Bujoreanu, M.V. Lungu, V. Tsakiris, A. Cucos, D. Talpeanu, E. Enescu.  
Samal, S.; Molnárová, O.; Průša, F.; Kopeček, J.; Heller, L.; Šittner, P.; Škodová, M.; Abate, L.; Blanco, I. Net-Shape NiTi Shape Memory Alloy by Spark Plasma Sintering Method. *Appl. Sci.* 2021, 11, 1802. <https://doi.org/10.3390/app11041802>  
Monogenov, A.N.; Marchenko, E.S.; Baigonakova, G.A.; Yasenchuk, Y.F.; Garin, A.S.; Volinsky, A.A. Improved mechanical properties of porous nitinol by aluminum alloying. *J. Alloy. Compd.* 2022, 918, 165617.  
Kaftaranova, M.; Hodorenko, V.; Anikeev, S.; Artyukhova, N.; Shabalina, A.V.; Gunther, V. Investigation of the Effect of Copper Addition on Physical and Mechanical Properties of TiNi-Cu Porous Alloy. *Metals* 2022, 12, 1696.  
Bewerse, C.; Emery, A.A.; Brinson, L.C.; Dunand, D.C. NiTi porous structure with 3D interconnected microchannels using steel wire spaceholders. *Mater. Sci. Eng. A* 2015, 634, 153–160.  
Bahador, Abdollah & Hamzah, Esah & Kondoh, Katsuyoshi & Abubakar, Tuty & Yusof, Farazila & Imai, Hisashi & Saud, Safaa & Ibrahim, Mustafa. (2017). Microstructure and Superelastic Properties of Free Forged Ti–Ni Shape-Memory Alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 28. 10.1016/S1003-6326(18)64683-7.  
Cirstea, C.D.; Povoden Karadeniz, E.; Cirstea, V.; Tolea, F.; Kozeschnik, E. Thermodynamic and Kinetic Simulations Used for the Study of the Influence of Precipitates on Thermophysical Properties in NiTiCu Alloys Obtained by Spark Plasma Sintering. *Nanomaterials* 2024, 14, 461. <https://doi.org/10.3390/nano14050461>  
Zhang Z, Liu Z, Lu J, Shen X, Science F. Direct the sintering mechanism in spark plasma sintering—Proof of the occurrence of spark discharge [J]. *Scr Mater*, 2014, 81: 56–59  
C. Velmurugan et al., Densification and microstructural evolution of spark plasma sintered NiTi shape memory alloy, *Advanced Powder Technology* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.06.026>

#### Information about authors

**Sagymbekova Elfira Sagymbekkyzy** – doctoral student, Center of Excellence VERITAS «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university» NJSK, Oskemen city, Kazakhstan, [esagymbekova@edu.ektu.kz](mailto:esagymbekova@edu.ektu.kz), +7-777-258-0606

**Kozhakhmetov Yernat Abilkhayrovich** – PhD, Center of Excellence VERITAS «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university» NJSK, Oskemen city, Kazakhstan, [ykozhakhmetov@edu.ektu.kz](mailto:ykozhakhmetov@edu.ektu.kz), +7-775-131-6886

**Aubakirova Danagul Mashanovna** – «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university» NJSK, Oskemen city, Kazakhstan, [danagulbinom2023@gmail.com](mailto:danagulbinom2023@gmail.com), +7-777-987-60-61

---