

Г.М. Кудайбергенова¹, Р.А. Советбаев^{1*}, Е.З. Нугман²

¹Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинки к., 20 А

²И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Қаныш Сәтбаев көшесі, 22

*e-mail: gulim88.88@bk.ru

ДАЙЫНДАМАЛАРДЫҢ НАНОҚҰРЫЛЫМДЫҚ МӘСЕЛЕЛЕРІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ҚАРҚЫНДЫ ПЛАСТИКАЛЫҚ ДЕФОРМАЦИЯ ӘДІСТЕРІМЕН ШЕШУ

Аңдатпа: Ультра ұсақ түйіршікті (УҰТ) немесе нано- және субмикрокристалдық құрылымы бар материалдар өздерінің бірқатар механикалық сипаттамалары (қаттылық және т.б.) бойынша дәстүрлі әдістермен алынатын материалдардан айтарлықтай жоғары, мысалы, құю және қысыммен өңдеу әдістерінен. Сондықтан мұндай қорытпалар (көбінесе алюминий, магний, титан негізіндегі қорытпалар) өнеркәсіп, әсіресе ғарыш, авиация және кеме жасауда тұрақты сұранысқа ие. Өте ұсақ түйіршікті металл құрылымын алудың негізгі әдісі - тең арналы бұрыштық престеу (ТАБП) болып табылады, бұл қарқынды пластикалық деформация (ҚПД) әдістерінің бірі. Бұдан басқа, жоғары қысымды бұралу, жинақталған орамды желімдеу, СОВО әдісі және басқа да бірқатар әдістер бар. Көрсетілген әдістерді қолдана отырып, коррозияға төзімді түсті қорытпалардан дайындамаларды өндіру өнеркәсіптік, жаппай өндіріс көлемі үшін әрқашан тиімді бола бермейді, сондықтан материалдардың ультра ұсақ түйіршікті құрылымын алу жолдарын әзірлеу және іздеу жалғасуда.

Бұл мақалада қорытпалардың өте ұсақ түйіршікті құрылымын алу әдістері, осы әдістердің артықшылықтары мен кемшіліктері қарастырылады. 6082 Алюминий қорытпасы үшін, үш орамды радиалды кескіш диірменде илектену арқылы ұқсас құрылымды алу әдісі қарастырылады.

Түйін сөздер: ультра ұсақ түйіршікті құрылым, пластикалық деформация, нано- және субмикрокристалдық құрылым, қарқынды пластикалық деформация, престеу, тең арналы бұрыштық престеу, жоғары қысымды бұралу, түсті қорытпалардан дайындамалар.

Кіріспе

Қарқынды пластикалық деформация (ҚПД) ықшам нано- және субмикрокристалды материалдарды алу әдістерінің бірі болып табылады [1,2]. Бұл әдіс қайта кристалданған аморфты күй белгілері бар жоғары фрагменттелген және дұрыс емес құрылым түзуге негізделген. Материалдың үлкен деформацияларына қол жеткізу үшін әртүрлі әдістер қолданылады: квазигидростатикалық қысыммен бұралу, тең арналы бұрыштық престеу, илемдеу және жан-жақты соғу. Бұл әдістердің мәні өңделетін материалдардың қайталанатын қарқынды пластикалық ығысу деформациясында жатыр, бұл ретте деформацияның шынайы логарифмдік дәрежесінің мәні 4-7 аралығына тең болады. Қарқынды пластикалық деформацияны қолдану арқылы орташа түйіршіктер мөлшерін азайтумен бірге, іс жүзінде кеуекті емес құрылымы бар массивтік үлгілерді алуға болады; Бұған наноұнтақтарды нығыздау арқылы қол жеткізу мүмкін емес.

Әсіресе, аэроғарыш өнеркәсібінде, кеме жасауда және медицинада дәстүрлі түрде қолданылатын алюминий және титан негізіндегі жеңіл және коррозияға төзімді құрылымдық қорытпалардың дайындамасына нанотехнологияны қолданудың келешегі зор.

Тең арналы бұрыштық престеу (ТАБП) үшін, металл шыбықтарын өңдеуде ҚПД ең танымал әдісі болып қала береді, өйткені дайындаманың негізгі өлшемдерін сақтай отырып, наноқұрылымды қалыптастыруға мүмкіндік береді [1, 2]. Бұл әдіс дайындаманы бұрышпен қиылысатын екі арна арқылы итеруден тұрады, ал арналардың қиылысында қарапайым ығысу деформациясы дайындаманың көлденең қимасының өлшемдерін өзгертпей жүзеге асырады, бұл оның қайталану деформациясына мүмкіндік тудырады.

Зерттеу әдістері

Осылайша, ТАБП әдісінің мәні, материалды $2\alpha = 90 - 150^\circ$ бұрышпен қиылысатын көлденең қимасын бірдей екі арна арқылы күшпен итеру болып табылады [1, 2]. Каналдардың қиылысу жазықтығында қарқындылығы жоғары қарапайым ығысудың біртекті деформациясы шоғырланған.

$$\Delta L = 2ctg\alpha.$$

Осы схемаға сәйкес материалды бірнеше циклдік өңдеу деформацияның өте жоғары қарқындылығын қамтамасыз етеді.

$$\Delta\Gamma = N\Delta\Gamma = 2Nctg\alpha,$$

Мұндағы N – циклдар саны. Алынған үлгі біркелкі кернеу-деформация күйінде, бірақ оның көлденең өлшемдері өзгермейді. Деформацияның арнайы логарифмдік дәрежесі мына формула бойынша анықталады.

$$\bar{\varepsilon} = \operatorname{arsh} \frac{\Gamma}{2} = \ln \left\{ \frac{\Gamma}{2} + \left[\left(\frac{\Gamma}{2} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}.$$

90°-қа жақын 2α бұрыштарын қолданған дұрыс, бұл кезде деформация қарқындылығының максималды деңгейіне жанасу қысымының шамалы өсуімен қол жеткізіледі.

Ғылыми нәтижелерді талқылау

"Прометей" КМ Орталық ғылыми-зерттеу институтында жартылай фабрикаттардың, оның ішінде массивтік жартылай фабрикаттардың беріктігі мен икемділігінің неғұрлым жоғары деңгейде қамтамасыз ету мақсатында 1561 және 1575 (Al-Mg және Al-MgSc жүйесі) деформацияланатын жоғары беріктігі бар алюминий қорытпаларында ТАБП-тың көмегімен регламенттелген ультра ұсақ түйіршікті (УҰТ) құрылымын алу бойынша [3, 4] жұмыстар орындалды, сонымен қатар қорытпалар мен күрделі пішінді бұйымдар алды. Ғылыми-зерттеу жұмыстарын жүргізу үшін арнаның көлденең қимасы 30x30 мм және қиылысу бұрышы 90°x110° болатын түсті металдардың қыздырылған қалыптары жобаланып, дайындалды.

Жұмыс авторлары [3,4] ТАБП-тың бірінші өтуі кезінде беріктік пен аққыштық шегінің тез өсуіне қол жеткізілетінін анықтады, бірақ бұл жағдайда пайда болған торлы құрылымның жетілмегендігі, кіші бұрыштық шекараларға байланысты. Неғұрлым тұрақты үлкен бұрыштық шекаралары бар ультра ұсақ түйіршікті құрылымды қалыптастыру үшін, бірнеше рет қайта өңдеу жүргізілді. Осы процестің еңбек сыйымдылығын төмендету мақсатында "Прометей" КМ ОҒЗИ-да "ВИЛС" ААҚ-мен бірлесіп, үш рет қиылысатын канал арқылы (дәстүрлі екеуінің орнына) 1561 алюминий қорытпасының РКУП шыбықтарына (Ø85 мм) тәжірибелік-өнеркәсіптік игеру жүргізілді. Бұл схема бірінші өту кезінде, тиімді деформацияны 2 есе арттыруға, уақытты (өту санын) және өңдеудің күрделілігін азайтуға мүмкіндік берді.

Жұмыста [3, 4] зерттелетін материалдың механикалық қасиеттері ТАБП әдісімен екінші канал арқылы алынған материалдың сынақ нәтижелерімен салыстырылды. Бұл салыстыру ТАБП үшін үш арналы матрицадағы бірдей өту саны 1561 қорытпасы үшін жоғары беріктік мәндерін алуға мүмкіндік беретінін көрсетті.

Авторлардың [3, 4] жүргізген зерттеулерінде ТАБП-дан алынған қорытпа құрылымының тұрақтылығы 30, 60 және 120 минут ішінде 100-400°С температурасында күйдіруден өткен үлгілерді механикалық сынау нәтижелері бойынша бағалады, бұл қасиеттердің айтарлықтай төмендеуі үлгілерді 200°С-тан жоғары қыздырғаннан кейін болатынын көрсетті, ал қыздыру температурасы 400°С дейін көтерілген кезде механикалық қасиеттердің төмендеу қарқыны байқалады. Таңдалған температура диапазонында қыздыру ұзақтығының артуы үлгілердің қасиеттеріне іс жүзінде әсер етпейді.

Осылайша, 1561 алюминий қорытпасының құйма дайындамалары ТАБП нәтижесінде, оларда жоғары беріктік пен икемділік деңгейін қамтамасыз ететін УҰТ құрылым қалыптасады.

Субмикрокристалды материалдардың құрылымы мен қасиеттерін зерттеу нәтижелерін талдауға арналған жұмыстар [1, 5, 6]. Авторлар нанокристалды материалдарды күйдіру, олардың микроқұрылымының эволюциясына әкелетінін көрсетті, оны шартты түрде екі кезеңге бөлуге болады. Бірінші кезеңде балқу температурасының шамамен 1/3 бөлігін құрайтын температурада күйдіру нәтижесінде, кернеулердің релаксациясы, дән шекараларының тепе-теңдік күйіне ауысуы және дәндердің шамалы өсуі жүреді. Екінші кезеңде күйдіру температурасының одан әрі жоғарылауы немесе оның ұзақтығының артуы, жинақталған қайта кристалдануды тудырады, яғни дәндердің іріленуіне әкеледі. Күйдірудің бірінші кезеңі Cu, Pd және Ti сияқты пластикалық деформацияланған материалдардың микроқаттылығын өлшеу нәтижелерінен жақсы байқалады.

УҰТ құрылымын алу мақсатында, каналды-бұрыштық басу [7] жұмысы арқылы, мысты динамикалық нұсқада деформациялау жүргізілді. Үлгілерді динамикалық деформациялау үшін тең арналы бұрыштық престоуде қолданылатын қымбат пресс-жабдықтың орнына ұнтақ

газдарының энергиясы пайдаланылды. Зеңбіректің көмегімен үлгілер 150-500 м/с жылдамдыққа дейін үдейеді. Кейін матрицаға бағытталды. Матрицада 90° бұрышпен қиылысатын екі-үш арна болды. Арналардың көлденең қимасы дәйекті түрде төмендеді. Материал 3-7 ГПа қысыммен $10^{5\text{с}^{-1}}$ жылдамдықпен деформацияланды.

Жұмыс [7] барысында М1 маркалы мыс үлгілеріндегі құрылымдық өзгерістер бір-екі өту кезінде, динамикалық престеуге ұшырады. Мыс бастапқы күйінде полиэдрлік құрылымға ие болды, оның орташа дәндерінің мөлшері ~100 мкм. Престеу процесінде жоғары жылдамдықты деформация және температураның бір мезгілде жоғарылауы әсерінен мыстың микроқұрылымы өзгерді. Жұмыс авторлары жасушалық дислокациялық құрылымдардың, микроөгіздердің жүйелерінің қалыптасуын және динамикалық полигонизация нәтижесінде пайда болған астарлы құрылымның қалыптасуын бақылаған. Бір арнадан екінші арнаға өту кезінде орналасқан аймақтарда және үлгілердің басында, жеке учаскелерде деформацияның локализациясы мен температураның жоғарылауына байланысты өлшемі 0,1-0,5 мкм жаңа қайта кристалданған түйіршіктер пайда болды. Жұмыста сынамалардың кейбір аймақтарында және турбулентті (құйынды) ағын элементтері бар учаскелерде локализацияланған ағыс аймақтары байқалды. Екі өтуден өткен үлгілердің негізгі бөлігінде субмикродисперсті (30-100 нм) дәндері бар жұқа талшықтардан тұратын құрылым табылды.

Осылайша, динамикалық каналды-бұрыштық престеуді нанокристалдық күйге дейін құрылымының айтарлықтай нақтылануымен бірге жүретін қарқынды пластикалық деформация әдісі ретінде қолдануға болады. Әдістің артықшылықтарының бірі - оның қысқа мерзімділігі.

Белгілі болғандай, ҚПДның бірнеше әдістері наноқұрылымдық күйде ерекше қасиеттері бар металдық материалдарды алуға мүмкіндік береді. Сондықтан [1] жұмыста титан никельді негізінде пішінді есте сақтау (ПЕС) әсері бар наноқұрылымды қорытпаларды алудың деформациялық әдістері, құрылымы мен қасиеттері қарастырылған. Оларды пайдалану микроқұрылымды өзгертуге, фазалық түрлендіруге және қорытпалардың пішінді есте сақтаумен байланысты физикалық-механикалық қасиеттеріне әсер етудің бірегей мүмкіндіктерін ашты.

Жұмыстың [1] мәліметтері бойынша, жоғары қысымды бұралу арқылы қарқынды пластикалық деформацияны (ҚПД) қолдану іргелі аспектіде өте пайдалы болды. Жоғары қарқынды пластикалық деформация қорытпалардың аморфизациясына дейін дәнді шекті ұнтақталуын қамтамасыз ететіні анықталды. Жұмыс авторлары бұл жағдайда аморфты матрица жоғары бұрмаланады, бірақ В2-торына жақын атом құрылымы бар нанобөлшектер бар екенін көрсетеді, олар төмен температуралық тепе-теңдіктен кейінгі нанокристалдау орталықтарына айналады. Нанонитинол беріктік шектері (2700 МПа дейін), өтімділігі (2000 МПа дейін), 15-20% икемділікте ПЕС-тегі реактивті кернеу (1300-1500 МПа дейін) рекордтық мәндерін, құрылым мен қасиеттері бойынша жоғары жылу тұрақтылығын көрсетеді. Жұмыста әр түрлі режимдер бойынша ТАБП әдісімен ҚПД қолдану арқылы алғаш рет ПЕС-пен көлемді наноқұрылымдық қорытпаларды жасауға мүмкіндік берді. Бұл жұмыста әртүрлі режимдерде ТАБП бойынша ҚПД әдісін қолдану алғаш рет пішінді есте сақтау көлемді наноқұрылымды қорытпаларды жасауға мүмкіндік берді.

[1] жұмыстың авторларының пікірінше, поликристалды прототиптермен салыстырғанда (синтез әдісіне байланысты орташа түйіршік мөлшері 30-100 мкм) көлемді (ТАБП-тан кейін) титан никельді наноқұрылымдық қорытпалары айтарлықтай артықшылықтары: күш, жоғары беріктік және пластикалық қасиеттерге ие. Өнеркәсіпте, арнайы техника мен медицинада нитинолды қолданудың бірқатар маңызды техникалық және әлеуметтік маңызды бағыттары бар, олар ұзын шыбықтар, жолақтар, түрлі типтік өлшемдегі сымдар түрінде қажет. Сондықтан, [1] жұмыста қорытпалардың механикалық сипаттамаларын жақсарту үшін, маңызды деформация пішінді есте сақтау әдісі ұсынылған.

Титан никельді негізіндегі қорытпаларда УҰТ күйінің қалыптасуы пішінді есте сақтау әсерлерінің, серпімділік пен беріктік қасиеттерінің айтарлықтай жақсырақ жиынтығына қол жеткізуге мүмкіндік беретіні белгілі. Сондықтан [8] жұмыста ТАБП әдісі арқылы Ti50Ni47.3Fe2.7 қорытпасында УҰТ құрылымын қалыптастыруға арналған. Бұл жұмыста УҰТ құрылымы бар Ti50Ni47.3Fe2.7 қорытпа үлгілерінің көлемді дайындамалары 723K тең арналы бұрыштық престеу (ТАБП) арқылы алынды. Арналардың қиылысу бұрышы 90° болды. Жалпы шынайы деформациясы 2, 6442 болатын үш деформация циклі жүргізілді. Ti50Ni47.3Fe2.7 қорытпа

үлгілерінің термосерпімді мартенситтік түрлендірулерінің реттілігі мен температуралық диапазондары, кристалдық құрылымы, микроқұрылымы, физикалық-механикалық қасиеттері ТАБП-қа дейін және одан кейін, сондай-ақ 673K температурада термиялық күйдіруден кейін зерттелді. ТАБП-тың екінші өтуінен кейін, қорытпаның субмикрокристалдық құрылымы (дән асты құрылымы фрагменттерінің орташа өлшемі ~ 300 нм) түзілетіні анықталды, бұл B2 фазасының рентгендік шағылысу (211) енінің екі есе ұлғаюына әкеледі. Өту санының одан әрі ұлғаюы, шағылысу енін аздап арттырады, бұл деформацияланған қорытпаның фрагменттерінің өлшемдерінің шамалы қосымша қысқаруын көрсетеді. Субмикрокристалдық күйдің пайда болуы осы қорытпадағы термосерпімді мартенситті түрлендірулердің ретін өзгертпейтіні көрсетілген: ірі түйіршікті де, субмикрокристалды үлгілерде де салқындату-қызу циклдеріндегі $B2 \leftrightarrow R \leftrightarrow B19'$ ретімен жүзеге асады. Өту санының артуы $B2 \leftrightarrow R$ температурасына әсер етпейді, $R \leftrightarrow B19'$ іске қосу температурасын сәл төмендетеді (18 градуска) және кері $B19' \leftrightarrow R$ интервалының 10 градуска тарылуына әкеледі.

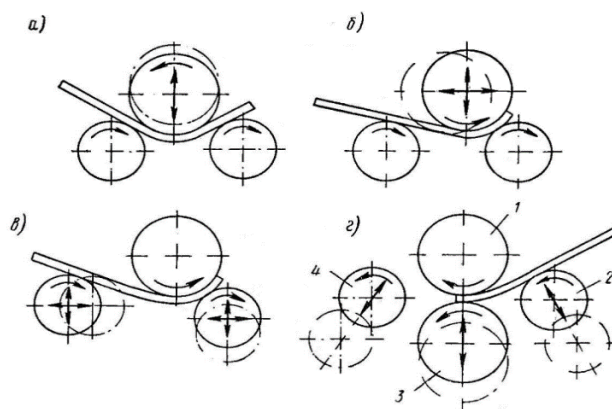
[8] жұмыста ТАБП-тан кейін алынған күйдің біртектілігін көрсететін нәтижелер алынды: дайындаманың әртүрлі бөліктерінен кесілген барлық үлгілерде, қорытпаның құрылымдық сезімтал сипаттамалары болып табылатын мартенситтік түрлендіру температуралары өлшеу қателігінің шегіне сәйкес келеді. Үлгідегі субмикрокристалды құрылымның қалыптасуы, деформацияланған үлгілерді сұйық азоттың қайнау температурасына дейін салқындату кезінде пайда болатын B19 разряд құрылымымен мартенситтік фазаның көлемдік үлесін айтарлықтай төмендетеді, бұл өлшем факторының әсерінен болуы мүмкін, ультра ұсақ түйіршікті үлгілердегі құрылым фрагменттерінің мөлшерін азайту кезінде жоғары температуралы B2 фазасы тұрақтанады.

Қазіргі уақытта материалтану ғылымында нано – және УҰТ құрылымы бар әртүрлі геометриялық көлемді наноқұрылымдары бар металдық материалдар дайындамаларын алуға мүмкіндік беретін ҚПД әдістері белсенді дамып келеді [5-9]. Ондаған және жүздеген нанометрді құрайтын құрылымдық элементтердің өлшемдері мұндай құрылымдардағы зат пен энергияны тасымалдау процестерінің өзгеруіне әкеледі. Бұл ретте бірегей физика-механикалық қасиеттері бар материалдардың жаңа күйлері қалыптасады [5, 9]. ҚПД-ны жүзеге асыратын ең танымал әдістерге жоғары қысымды бұралу (ЖҚБ), жан-жақты соғу (ЖЖС) және т.б. сияқты өңдеу схемалары жатады, олар жұмыстарда ең егжей-тегжейлі сипатталған [2-10].

Жоғары қысымды бұралу. Жоғарғы қысыммен бұралудағы үлгілер бойколардың арасына орналастырылады және қысыммен (5-10 ГПа) қысылады. Жылжымалы бойконы айналдыру кезінде, элементтері ығысу арқылы жүзеге асырылатын деформацияның шынайы логарифмдік дәрежесіне ($e > 5$) қол жеткізуге болады. Жоғары қысыммен бұралу әдісін материалға және мәніне байланысты нанокристалды және аморфты құрылымы бар диаметрі 20 мм-ге дейінгі дискілер түрінде интегралды үлгілерді алу үшін қолданылуы мүмкін [9]. Алынған үлгілердің шектеулі көлеміне байланысты бұл әдіс өнеркәсіпте қолдану үшін өзекті емес, бірақ нанокристалдық құрылымдарды зерттеу үшін үлгілі материал алу тұрғысынан қызықты болып келеді.

Жан-жақты соғу. УҰТ-ті құрылымдары бар көлемді жартылай фабрикаттарды алу үшін, Г.А. Салищев пен бірлескен авторлар [11] ұсынған деформация температурасының кезек-кезегімен төмендеуі жан-жақты изотермиялық соғу әдісі сияқты ҚПД әдісі де ерекше қызығушылық тудырады. Жан-жақты соғу схемасы еркін соғу операцияларын бірнеше рет қайталауға негізделген. Осы әдіспен титан, никель және интерметаллидтер негізіндегі деформациялануы қиын қорытпаларда УҰТ-тер құрылымын (60-100 нм) алуға болады, өйткені өңдеу жоғары температурадан басталады және бұл ретте құралға шағын үлестік жүктемелер қамтамасыз етіледі. Жан-жақты соғу әдісі плиталар түрінде үлкен өлшемдердегі үлгілерді шығарады, олардан, мысалы, прокаттау арқылы табақты жартылай фабрикаттарын алуға болады. Бұл әдістің негізгі кемшіліктері салыстырмалы түрде жоғары температура болып табылады.

Соңғы жылдары қолданыстағы ҚПД әдістерін әзірлеуде және өңдеуде жаңа схемалар құруда белсенділік арттырып келеді. Негізгі зерттеулер нәтижесінде алынған көлемді дайындамалардың өлшемдерін ұлғайту, сондай-ақ өндірістік процесті өнеркәсіптік өндіріс жағдайларына жақындату үшін қиын деформацияланатын материалдарға қатысты ҚПД технологиясын жетілдіру бойынша жұмыстар жүргізілуде.



Сурет 1 – Үш білікті радиалды кескіш станда илемдеу

Осындай шарттарды зерттейтін үш білікті радиалды кескіш станда илемдеу әдісі болып табылады. Осы жұмыс бойынша 6082 алюминий қорытпасына табиғи илемдеу эксперименті жүргізілді (1-сурет), ол үш рет өту кезінде дайындаманың бастапқы диаметрі 45 мм-ден диаметрі 35 мм-ге дейін илектеліп алынған үлгілер, қазіргі уақытта аққыштық шегін анықтау үшін созылу сынақтарына ұшырайды және осы қорытпа үшін пластикалық деформацияға дейінгі және кейінгі микроқұрылым зерттеледі.

Қорытынды

Алюминий қорытпаларын үш білікті радиалды кескіш станда илемдеу процесі қарқынды пластикалық деформацияның бір әдісі болып табылады, онда біз қорытпаның ультра ұсақ түйіршікті құрылымын аламыз және сәйкесінше бізге қажет механикалық қасиеттерді өнеркәсіптік жолмен аламыз. Бұл мақала коррозияға төзімді жеңіл түсті қорытпалардың қажетті УҰТ құрылымын алу тұрғысынан ғана емес, сонымен қатар оны жаппай өнеркәсіптік әдіспен алу тұрғысын қарқынды пластикалық деформация әдістерін көрсететін шолу болып табылады, бұл үш білікті радиалды кескіш станда илемдеу әдісі ең жақсы болып табылды.

Список литературы

1. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – Москва – Логос, 2000. – 272 с.
2. Процессы пластического структурообразования металлов / В.М. Сегал и др. – Минск: Наука и техника, 1994. – 428 с.
3. Перевезенцев В.Н. // Высокоскоростная сверхпластичность сплавов системы Al-Mg-Sc-Zr. / В.Н. Перевезенцев и др. // Металлы. – 2004. – № 1. – С. 36-43.
4. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – С. 416.
5. Optimization of wear parameters for ECAP-processed ZK30 alloy using response surface and machine learning approaches: a comparative study / M. Shaban et al // Sci Rep. – 2024. – № 14. – P. 9233. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59880-0>.
6. Valiev R.Z. / Mater. Sci. Eng. // R.Z. Valiev, A.V. Korznikov, R.R. Mulyukov // A168. – 1993. – P. 141-48.
7. Хомская И.В. / Деформирование меди методом канально-углового прессования с целью получения ультрамелкозернистой структуры / И.В. Хомская, В.И. Зельдович, Е.В. Шорохов // Всероссийская конференция по наноматериалам «НАНО 2007», – Новосибирск, 2007. – С. 97 – 102.
8. Формирование ультрамелкозернистой структуры в сплаве Ti50Ni47,3Fe2,7 методом РКУП / В.Н. Гришков и др. // Всероссийская конференция по наноматериалам «НАНО 2007», – Новосибирск, 2007. – С. 126-131.
9. Valiev, R.Z. Achieving exceptional grain refinement through severe plastic deformation: new approaches for improving the processing technology/ R.Z. Valiev, T.G. Langdon // Metal. Mater. Trans. A. – 2011. – vol. 42A. – P. 2942-2951.
10. Mazilkin A.A. Formation of Nanostructure during High-Pressure Torsion of Al–Zn, Al–Mg and Al–Zn–Mg Alloys / A.A. Mazilkin et al // Defect and Diffusion Forum. – 2005. – Vol. 237-240. – P. 739-744.

11. Salishchev, G.A. Evolution of microstructure and mechanical behavior of titanium during warm multiple deformation / G.A. Salishchev, S.V. Zharebtsov, R.M. Galeev // *Ultrafine Grained Materials II*, TMS. – 2003. – P. 123-131.
12. Beygelzimer Y. Microstructural evolution of titanium under twist extrusion / Y. Beygelzimer et al // *Proceeding of «Ultrafine Grained Materials II»*, TMS Annual Meeting in Seattle. Washington. – 2002. – P. 43-46.

Г.М. Кудайбергенова¹, Р.А. Советбаев^{1*}, Е.З. Нугман²

¹Университет имени Шакарима города Семей,

071412, Республика Казахстан, г. Семей., ул. Глинки, 20 А

²Казахский национальный исследовательский технический университет,

050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. К. Сатпаева, 22

*e-mail: gulim88.88@bk.ru

ПРОБЛЕМЫ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК И ИХ РЕШЕНИЕ МЕТОДАМИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Конструкционные материалы с ультрамелкозернистой (УМЗ) или нано- и субмикроструктурной структурой по ряду своих механических характеристик (твердость и др.) значительно превосходят материалы, полученные традиционными способами, это и литье, и способы обработки давлением. Именно поэтому на подобные сплавы (в основном сплавы на основе алюминия, магния, титана) имеется постоянный спрос в промышленности, особенно в космической, авиационной и судостроении. Основным методом получения ультрамелкозернистой структуры металла является равноканальное угловое прессование (РКУП), это один из способов интенсивной пластической деформации (ИПД). Кроме этого, существует ряд других методов, это кручение под высоким давлением, накопительное рулонное склеивание, метод КОВО и ряд других. Получение заготовок из коррозионно-стойких цветных сплавов перечисленными методами не всегда является эффективным для промышленных, массовых объемов производства именно поэтому продолжается разработка и поиск способов получения ультрамелкозернистой структуры материалов.

В данной статье рассмотрены методы получения ультрамелкозернистой структуры сплавов, преимущества данных методов и недостатки. Для алюминиевого сплава 6082, рассмотрен способ получения подобной структуры путем прокатки на трехвалковом радиально-сдвиговом стане.

Ключевые слова: ультрамелкозернистая структура, пластическая деформация, нано- и субмикроструктурная структура, интенсивная пластическая деформация, прессование, равноканальное угловое прессование, кручение под высоким давлением, заготовки из цветных сплавов.

G.M. Kudaybergenova¹, R.A. Sovetbayev^{1*}, E.Z. Nugman²

¹Shakarim University of Semey,

071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20 A Glinka Street

²Kazakh National Research Technical University,

22 K. Satpayev str., Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan

*e-mail: gulim88.88@bk.ru

PROBLEMS OF NANOSTRUCTURING OF BLANKS AND THEIR SOLUTION BY METHODS OF INTENSIVE PLASTIC DEFORMATION

Structural materials with ultrafine-grained (UFG) or nano- and submicrocrystalline structure significantly surpass materials obtained by traditional methods, such as casting and pressure processing, in a number of their mechanical characteristics (hardness, etc.). That is why such alloys (mainly alloys based on aluminum, magnesium, titanium) are in constant demand in industry, especially in space, aviation and shipbuilding. The main method for obtaining an ultrafine-grained metal structure is equal-channel angular pressing (ECAP), which is one of the methods of intense plastic deformation (IPD). In addition, there are a number of other methods, such as high-pressure torsion, accumulative roll gluing, the KOBO method and a number of others. Obtaining blanks from corrosion-resistant non-ferrous alloys by the listed methods is not always effective for industrial, mass production volumes, which is why the development and search for methods for obtaining an ultrafine-grained structure of materials continues.

This article discusses methods for obtaining an ultrafine-grained structure of alloys, the advantages of these methods and their disadvantages. For aluminum alloy 6082, a method for obtaining a similar structure by rolling on a three-roll radial-shear mill is considered.

Key words: ultrafine-grained structure, plastic deformation, nano- and submicrocrystalline structure, severe plastic deformation, pressing, equal-channel angular pressing, high-pressure torsion, non-ferrous alloy blanks.

Авторлар туралы мәліметтер

Гульнур Муратовна Кудайбергенова – «Машина жасаудағы цифрлық технологиялар және логистика» кафедрасының оқытушысы, Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Қазақстан; e-mail: gulim88.88@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3841-982X>.

Раил Аянович Советбаев* – «Машина жасау өндірісін цифрландыру» мамандығы бойынша докторант, ҚазҰТЗУ, Энергетика және машина жасау институты, Алматы, Қазақстан Республикасы; e-mail: rsovetbayev@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3605-515X>.

Ерік Зейнелұлы Нұғман – «Машина жасау» кафедрасының меңгерушісі, «Машина жасау» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, PhD докторы, ҚазҰТЗУ, Энергетика және машина жасау институты, Алматы, Қазақстан Республикасы; e-mail: e.nugman@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4537-9440>.

Сведения об авторах

Гульнур Муратовна Кудайбергенова – преподаватель кафедры «Цифровые технологии в машиностроении и логистика», Университет имени Шакарима города Семей, Республика Казахстан; e-mail: gulim88.88@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3841-982X>.

Раил Аянович Советбаев* – докторант по специальности «Цифровизация машиностроительного производства», КазННТУ им. К.И. Сатпаева, Институт энергетики и машиностроения, Алматы, Республика Казахстан; e-mail: rsovetbayev@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3605-515X>.

Ерик Зеинелович Нугман – Заведующий кафедрой «Машиностроение», ассоциированный профессор кафедры «Машиностроение», доктор PhD, КазННТУ им. К.И. Сатпаева, Институт энергетики и машиностроения, Алматы, Республика Казахстан, e-mail: e.nugman@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4537-9440>.

Information about the authors

Gulnur Muratovna Kudaibergenova – Teacher at the Department of Digital Technologies in Mechanical Engineering and Logistics, Shakarim University of Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: gulim88.88@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3841-982X>.

Rail Ayanovich Sovetbayev* – doctoral student in «Digitalization of machine-building production», K.I. Satbayev KazNRTU, Institute of Energy and Mechanical Engineering, Almaty, Kazakhstan Republic; e-mail: rsovetbayev@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3605-515X>.

Yerik Zeynelevich Nugman – Head of the Department of Mechanical Engineering, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, PhD, K.I. Satbayev KazNRTU, Institute of Energy and Mechanical Engineering, Almaty, Kazakhstan Republic; e-mail: e.nugman@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4537-9440>.

Редакцияға енуі 26.11.2024

Өңдеуден кейін түсуі 03.03.2025

Жариялауға қабылданды 04.03.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1\(17\)-43](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-43)

IRSTI: 29.19.15



N. Kadyrbolat^{*}, R. Kurmangaliyev¹, Z. Satbayeva^{1,2}, A. Shynarbek¹, D. Zhasbolatov³.

¹Engineering Center «Hardening technologies and coatings», Shakarim Semey University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Fizkulturnaya str., 4a

²TOO «Plasma Science»,

070018, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Gogol str. 7G

³Niigata University, 8050, Japan Nishi-ku, Niigata, 950-2181

*e-mail: ersinnur44@gmail.com

THE INFLUENCE OF ELECTROLYTIC PLASMA HARDENING ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF WORKING PARTS OF AGRICULTURAL MACHINERY

Abstract: In this paper, we investigate the improvement of the operational and mechanical properties of 45 steel used in agricultural machinery by electrolytic plasma quenching (EPH). The experiments were carried out under three treatment modes: 320 V voltage, 50 A current and exposure time of 9 seconds. Microstructure analysis showed the formation of a martensitic layer with a thickness of 500-550 microns, which led to an increase in the microhardness of steel from 200 HV to 683 HV, that is, 3.4 times. The zonal structure