

МЕХАНИКА

МРНТИ 30.19.51, 53.49.07

*С.А.Машеков¹, А.Е.Нуртазаев¹, А.С.Машекова²,
М.М.Акимбекова¹, Э.А.Тусупкалиева¹, М.Р.Мауленова¹*

¹Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Алматы қ., Қазақстан)

²Назарбаев Университеті, Астана қ., Қазақстан

ҚҰРЫЛЫМЫ БІРТЕКТІ ЕМЕС АЛЮМИНИЙ ҚОРЫТПАЛАРЫН БҰРАНДАЛЫ ҚҰРАЛДА ЖӘНЕ БОЙЛЫҚ-СЫНАЛЫ ОРНАҚТА ИЛЕМДЕ- ГЕНДЕКЕРНЕУЛІ-ДЕФОРМАЦИЯЛЫ КҮЙДІ ЗЕРТТЕУ

Түйіндеме. Жұмыста шеткі элементтер әдістемесін және MSC.SuperForge бағдарламасын қолданып, бұрандалы пішінбілік пен бойлық-сыналы орнақта дайындаманы илемдеген кезде пайда болатын кернеулі-деформациялы күй зерттелді. Алынған мәліметтер негізінде, АД31 алюминий қорытпасында жасалған жолақтарда бұрандалы пішінбілік пен бойлық-сыналы орнақта илемдегенде Кернеулі деформациялық күй біркелкі таралатындығы анықталды. Кернеулі деформациялық күй біркелкі таралуы, біртекті ұсақтүйіршікті құрылымды қалыптастыратындығын және беріктік пен пластикалық қасиеттерді жоғарлататындығын көрсетті. Құрылымның өртектілік көрсеткіштерінің ескерілуімен, бұрандалы пішінбіліктерде және бойлық-сыналы орнақта илемдеу процесін шеткі элементтер әдісімен модельдеуді жүргізіп, пішін өзгеру процесінде алюминий қорытпасы жаймаларының зақымдалуына, қосындылардың көлемдік үлесі, түрі және дайындаманың қимасы бойымен орналасуы әсер ететіндігі және қосындылардың механикалық қасиеттерінің мәніне байланысты кернеу мен деформация қарқындылығының максималды немесе минималды мәндері қосындыларға жақын орналасқан аймақтарда шоғырланатыны дәлелденді. **Түйінді сөздер:** АД31 алюминий қорытпасы, илемдеу, бұрандалы пішінбілік, қарқынды пластикалық деформация, бойлық-сыналы орнақ, кернеулі-деформациялы күй, сандық модельдеу, кернеу, деформация қарқындылығы, бірлік жаншу.

Аннотация. В работе методом конечных элементов и в программе MSC.Super Forge исследовано напряженно-деформированное состояние заготовки при прокатке в волнистых валках и продольно-клиновом стане. На основе полученных данных установлено, что прокатка листового материала из алюминиевого сплава АД31 в волнистых валках и продольно-клиновом стане обеспечивает равномерное распределение напряженно-деформированного состояния, которое способствует формированию однородной мелкозернистой структуры, что приводит к повышению прочностных свойств сплава АД31. Показана сравнительная оценка размеров зерен ультрамелкозернистой структуры после прокатки полос в волнистых валках и продольно-клиновом стане. Приведены данные о влиянии количества проходов при прокатке полос в волнистых валках, а также единичных обжатиях при прокатке полос в продольно-клиновом стане на параметры микроструктуры алюминиевого сплава АД31.

Ключевые слова: алюминиевый сплав АД31, прокатка, волнистые валки, интенсивная пластическая деформация, продольно-клиновый стан, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование, интенсивность напряжений, интенсивность деформаций, единичное обжатие.

Abstract. In the work by the finite element method and the MSC.SuperForge program, the stressed-deformed state of the billet was investigated during rolling of corrugated rolls and a longitudinal-wedge mill. On the basis of the data obtained, rolling of sheet material from aluminum alloy AD31 in corrugated rolls and a longitudinal-wedge mill ensures uniform distribution of stressed-deformed state. Even distribution promotes formation stressed-deformed state homogeneous fine-grained structure, which leads to an increase in the strength properties of the alloy AD31. A comparative estimation of grain sizes of ultrafine-grained structures after rolling strips in corrugated rolls and a longitudinal-wedge mill is carried out. The characteristic parameters of the structure are presented. It is shown that a sheet material made of aluminum alloy AD31 ensures the formation of a uniform ultrafine-grained structure, which leads to an increase in the strength properties of the alloy and to the preservation of good plasticity.

Key words: aluminum alloy AD31, rolling, corrugated rolls, severe plastic deformation, longitudinal wedge mill, stressed and strained state, numerical simulation, stress intensity, the intensity of the deformation, a single reduction.

Кіріспе

Металдарды қысыммен өңдеу (МҚӨ) процестерін модельдеген кезде өңделетін материалды изотропты материал ретінде қабылдайтындығы белгілі [1]. Мұндай тәсілдеме модель дайындау процесінің еңбек шығындарын, оның есептік уақытын, қажетті бастапқы деректер мен есептеу ресурстарын төмендетуге мүмкіндік береді. Жаңа заманауи материалдар мен МҚӨ әдістерінің дамуымен компьютерлік модельдің болжау дәлдігіне қойылатын талаптар жоғарылады. Өңделетін материалдың микроқұрылымының ескерілуімен өңдеу процесінде кернеулі-деформациялы күйді (КДК) таралуын зерттеудің шынайы қажеттілігі туындады.

Бұл өз кезегінде, пластикалық деформациясының көп деңгейде өту концепциясының туындауына [2,3], кейінірек МҚӨ процестерін зерттеудің екі деңгейлік концепциясының [4] туындауына әкелді. Берілген тұжырымдамалық тәсілдемелер сол уақытта, әртүрлі деңгейде деформацияны жүзеге асыру және шоғырландыру жөнінде тұжырымдалған ұсыныстарды жүйелендірді және кернеулі-деформацияланған күйді макродеңгейде бағаламай микродеңгейде зерттеу және керісінше жүзеге асырылмайтындығын дәлелдеді. Осының салдарынан қазіргі уақытта, деформацияланатын материалды тек изотропты деп жасалған модельдердің, болжау қабілеттілігінің салыстырмалы төмен болатындығын дәлелдейтін жұмыстар көп жарияланды [2-8].

Жалпы жағдайда материалдар құрылымының әртектілігін үш деңгейде көрсетуге болады [9]:

Макродеңгей. Айырмашылығы, құрылымның әртектілігі аспапсызкөзбен көрінуінде. Мысал ретінде, сыңарлар қасиетінің айырмашылығы айқын көрінетін көпкомпонентті материалды, мысалы, биметалды болат-мыс сымын айтуға болады.

Мезодеңгей. Бұл деңгей, оптикалық үлкейту арқылы ажыратуға болатын, құрылымның әркелкілігін зерттеудің аралық деңгейі болып саналады.

МҚӨ тәжірибесінде металл емес қосындылар, олардың дайындама мен дайын өнімнің механикалық қасиеттеріне әсері, үлкен мәселені тудырады. Сонымен қатар, бұйымды өндіргенде

өңделетін дайындаманың бұзылуын болдырмас үшін, осы қосындылардың шекті мөлшерін бағалау қажет болады. Бірақта қазіргі кезде қосындылардың шекті мөлшерін бағалау әдістері де үлкен мәселені тудырады.

Қоспалардың мынандай екі түрін бөліп көрсетуге болады [10]: металл қоспалары және металл емес қоспалар. МҚӨ процестері үшін жоғары қызығушылықты және тәжірибелік маңыздылықты металл емес қосындылар алды. Себебі металл қосындыларында негізгі материалға белгілі бір жақындық бар және дайын бұйымның қасиеттеріне елеулі әсер етпейді.

Оған қоса, ұсақ дисперсті қосындылар дайын бұйымдардың механикалық қасиеттерін нашарлатпайды. Олар белгілі бір жағдайларда айтылған қасиеттерді арттыруы мүмкін. Мәселен, құйылған дайындамаларды өндіру сатысында балқымаға ұсақ дисперсті қиын балқитын ұнтақтардың енгізу, материалдық пластикалық қасиеттеріне жағымды әсер етіп, қосымша кристалдану орталықтарын құрып, ұсақталған құрылымды алуға мүмкіндік береді.

Пішіні мен таралуына сәйкесті металдық емес қосындылар, ГОСТ Р ИСО 4967-2009 сәйкесті бес негізгі топқа бөлінеді [11]:

- сульфидтер түріндегі қоспалар – пішін коэффициентінің кең аралығы бар қатты деформацияланған жеке бөлшектер (ұзындығы/ені қатынасы);
- алюминаттар түріндегі қоспалар – көптеген деформацияланбаған көпбұрышты бөлшектер, пішін коэффициенті төмен, деформациялау бағытына бағытталған;
- силикаттар түріндегі қосындылар – пішін коэффициентінің кең аралықта өзгертін қатты деформацияланған жеке бөлшектер;
- глобуляр тотықтар түріндегі қосындылар – пішін коэффициенті төмен болатын деформацияланбайтын, ретсіз таралған бөлшектер;
- дара глобулярлы тотықтар түріндегі қосындылар – диаметрі кемінде 13 мкм болатын дөңгелек дара бөлшектер.

Глобуляр пішіндес металл емес қоспалар қауіпті емес, себебі жарықшақтардың туындауы мен дамуына әсер ететін кер-

неу шоғырлауыштарын құрмайды [12,13]. Сондықтан, технологиялық процестің ерекшеліктерімен шартталған металл емес қосындылар кездескен жағдайда, глобуляр пішіндес қоспалар түзілуіне әсер ету ұсынылады. Оған белгілі бір модификациялаумен қол жеткізуге болады. Деформацияға ұшырамайтын сүйір бұрышты қосындылар, үшкір қосындының ұшында жарықшақтардың пайда болу мүмкіндігі салдарынан өте қауіпті болып саналады.

Қоспалардың пластикалық қасиеті өңдеу температурасынан тәуелді екені белгілі [14]. Тотықтардың қосылыстары, құрамына байланысты төмен температураларда сынғыштыққа және жоғары температураларда иілімдікке ие болады. Ары қарай қысыммен өңдеген кезде пластикалық қасиеті жоғары қоспалардың кездесуі, қасиеттердің ауқымды анизотропиясына әкеледі. Себебі, мөлшері үлкен деформациялау күшін түсірген кезде, металл ағатын бағытпен материалдық бағытталған құрылым түзіледі. Илемдеу және сым созу өндірісіне алынған бұйымның құрылымы, созу кернеулерінің бағытымен бағыттас болады.

Қоспалардың өлшемі мен орналасуы үлкен мәнге иемденеді. Осы қоспалардың ішінде екі топты бөліп көрсетуге болады [9]. Эндогенді қоспалар әдетте, дайындама қимасы бойынша біркелкі таралады және көлемнің 1 %-нан аспайды. Олар өндірістің бастапқы сатыларында (балқыту, қышқылсыздану, тарата құю, кристалдану) химиялық реакциялардың нәтижесінен түзіледі. Экзогенді қоспалар – сұйық болатқа сырттан түскен бөлшектер. Әдетте олар, қосындылардың аса қауіпті түрі болып келеді. Себебі өлшемдері өте ауқымды болып, дайындаманың қайсыбір облысында шоғырлануы мүмкін.

Материал құрылымындағы қоспалар жиі өндіріс ерекшеліктерімен байланысты болып, шарасыз пайда болатындығын айта кеткен жөн. Сондықтан олардың дайын бұйым қасиеттеріне кері әсер етуін максималды төмендеткен дұрыс [14]. Ол үшін қосындылар өлшемін максималды ұсақтап, глобулярлы пішінді сақтау қажет. Белгілі бір жағдайларда материалдар қасиеттерін жоғарылатуға болады. Бұндай жағдай да қоспалар дисперсті-беріктенген композитті арматуралайтын материал сияқты әрекет етуі

қажет.

Микродеңгей. Материал микроқұрылымының құрамдастары ықшамды емес орта ретінде қарастырылады, мұнда құрылымдық құрамдастар композициялық материалдың элементтері болып келеді [9].

Металл мен қорытпаларды тұтас орта деп санау қабылданған. Себебі құрылымның әртектілігі бұйым өлшемдерімен салыстырғанда немқұрайлы аз. Алайда белгілі бір шарттарда олардың механикалық қасиеттерінің анизотропиясы өте ауқымды болады [12]. Мәселен, қысыммен өңдеуден кейін металдар мен қорытпалардың механикалық қасиеттері, ұзындығы мен көлденең бағытта ерекшеленуі мүмкін.

Металл құрылымын композициялық орта ретінде қарастыру, металл мен қорытпалардың механикалық сипаттамаларын есептеуге негізделген әдістеменің қолдану, металл мен қорытпалардың механикалық қасиеттерін есептеу үшін композициялық материалдардың механика аппаратын қолдануға мүмкіндік береді [15]. Мұндай тәсілдемені қолданғанда материалдың барлық көлеміндегі үздіксіз құрамдастар матрица ретінде, ал дискретті құрамдастар – беріктендіруші фаза ретінде қабылданады.

Матрицадағы беріктендіру фазасының геометриялық өлшемдері мен олардың таралуына байланысты, материал құрылымының келесі негізгі нұсқаларын бөліп көрсетуге болады [15]:

- ұзын талшықтармен арматураланған матрица (илемдеу, сым созу сияқты, қысыммен өңдеудің кейбір түрлерінен кейін алынған металдар құрылымы);
- қысқа талшықтармен арматураланған матрица (ферритті-перлитті болат құрылымы, мұнда беріктендіру фазасы қызметін пластиналы перлит атқарады);
- дисперсті-беріктенген материалдар (түйіршікті перлит кездесетін болат құрылымы).

Микродеңгейде бірқатар құбылыстарды сипаттау принципіалды мүмкін еместігі және деформация мен қирау процестерін талдаған кезде аса жоғары масштабты деңгейге өту қажеттілігі, микроқұрылымы әртүрлі болатын материалдарды жүктеген кезде, олар бірдей құбылыс пен ұқсас заңдылықтарды көрсететіндігін

айқындайды [16]. Мысалы, кернеулер өзгерісі, асаилемділік, беріктендіру коэффициенттерінің ауытқулары, Хаазен - Келли, Кайзер, Баушингер эффектілері және т.б.

Қазіргі уақытта, микро- және макро масштабты деңгейлер арасындағы аралықта, яғни мезоскопиялық деп аталатын масштабтық деңгейде деформацияланатын қатты денеде дамиды процестерді қарастыруға негізделген тәсілдеме қарқынды дамып келе жатыр. [16] жұмыста деформацияланатын қатты дене физикасы мен механикасының қиылысатын жерінде жасалған біраз жұмыстарға аналитикалық шолу жүргізіліп, жаңа ғылыми бағыт - физикалық мезомеханика ұсынылған.

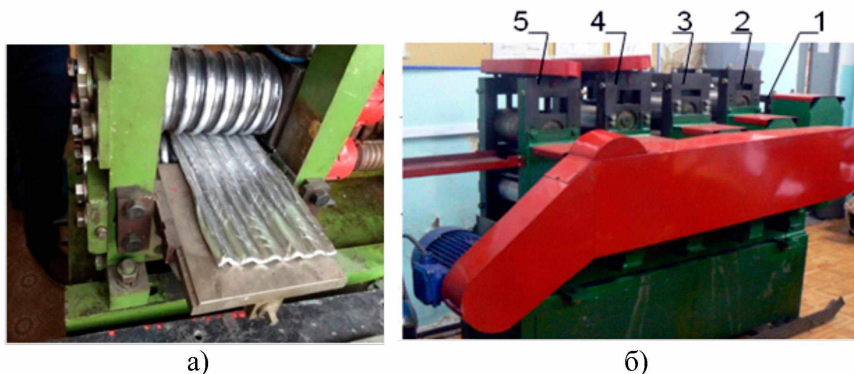
Сонымен, бірқатар заманауи материалдарға тұтас орта механикасы тәсілдемесін модельдеу кезінде қолдану мүмкін емес [2-4]. Бұл болат пен қорытпалар қасиеттері "орташаланған" жағдайда, осы материалдардың микроқұрылымдық тәртібінің басты технологиялық ерекшеліктерінің ескерілмеуіне байланысты. МҚӨ процестерін зерттеудің екі деңгейлі концепциясы мульти-масштабты модельдердің құрылу негізіне салынды. Олардың есептелуі макромоделі (изотропты материалдың дәстүрлі моделі) мен көрнекі көлем моделінің (микроқұрылым аймағының моделі) қос әрекеттесуіне негізделген. Бірінші модель деформацияланатын көлемге түсетін макржүктемелер мен макродеформациялар жөнінде нақты ақпарат алуға мүмкіндік береді, ал екінші модель осы жүктемелер әсерінен макромоделінің нақты бір нүктесінде дербес микрокөлемнің тәртібін көрсетеді.

Кез келген қорытпаның микроқұрылымының талдайтын болсақ, белгілі бір құрамдастарды бөліп көрсетуге мүмкіндік бар екендігі бізге мәлім [12]. Бұндай жағдайда, құрылымды талдау үшін үлкен үлкейтуді қолданатын болсақ, онда көптеген құрылымдық құрамдастарды анықтайтын боламыз.

Мақалада, бұрандалы құралда және бойлық-сыналы орнақта дайындаманы илемдегенде пайда болатын кернеулі-деформациялы күйге, қосымша құралсыз немесе оптикалық микроскоп көмегімен анықтауға болатын мезодеңгейде құрылымдық элементтердің әсері қарастырылды.

Тәжірибе жабдықтары, материалдары мен әдістемесі

Зерттеу жүргізу үшін бұрандалы жұмысшы беттерге иемденген пішінбіліктері бар орнақты қолдандық (сурет 1) [17]. Сонымен қатар болат пен қорытпалардан жолақтарды илемдеуге арналған көпқызметті үздіксіз бойлық-сыналы орнақты пайдаландық (сурет 2) [18].



Сурет 1. Бұрандалы құрал орнатылған ДУО илемдеу орнағы (а) және бойлық-сыналы орнақ (б): 1,2, 3 – басқыш механизмдері жоқ қапастар; 4,5 – басқыш механизмдері бар қапастар

Бұрандалы құралдың жоғарғы пішінбілігінің дөңес пен ойық аймақтары төменгі пішінбіліктің дөңес пен ойық аймақтарына қарама-қарсы орналасып, айтылған дөңес пен ойық аймақтар бұрамалы сызықты құрады. Бұранданың жанама сызығы мен жанасу нүктесі арқылы өтетін пішінбілік іргесіне перпендикулярлы орналасқан сызық арасындағы бұрыш 45° - 60° тең. Жоғарғы мен төменгі пішінбіліктің дөңестері мен ойыстары өлшемі бірдей енге және осыған сәйкесті бәрдей биіктік пен тереңдікке иемденетінін айта кеткен жөн.

Осы құралда дайындаманы илемдегенде, жоғары пішінбіліктің жұмысшы беттінің дөңестері төменгі пішінбіліктің жұмысшы беттінің ойықтарына қарама-қарсы орналасады. Бірінші және келесі өтімдерде илемдеуді мынандай бірлік жаншумен жүзеге асырады (сәйкесті жазылған): $\varepsilon = \Delta h_B / H_o$ және

$$\varepsilon = 2\Delta h_B / H_o$$

мұндағы Δh_B – бұрандалы жұмысшы беттер дөңестерінің биіктігі немесе ойықтарының тереңдігі;

H_o – дайындаманың бастапқы биіктігі.

Мұндай құралда илемдеген кезде, дайындаманың бойлық және көлденең қималарында таңбасы айнымалы иілу деформациясы пайда болып, дайындаманың барлық қимасы бойынша металдың құрылымы тиімді ұнтақталады. Осылай деформациялағанда, илемдеу барысында түзілетін дөңестер мен ойықтар илемделетін жолақтардың ені бойынша ығысып, дайындаманың қимасы бойынша қосымша макроығысуды тудырады. Қосымша макроығысудың туындауы металдар мен қорытпалар құрылымының қосымша ұсақталуына әкеледі, яғни сапалы илем алуға қажетті қосымша шарттар орындалады.

Үздіксіз бойлық-сыналы орнақ жұмысшы қапастардан, электр қозғалтқыштан, муфтадан, жетексіз тіреу және жетекті жұмысшы пішінбіліктерден, тұғырдан, тіреу тақтасынан тұрады. Айнымалы тоқ қозғалтқышынан жетекті алатын қапастардың әрқайсы диаметрі тұрақты болатын жұмысшы және тіреуші пішінбіліктерден тұрса да, кезекпен орналасқан әрбір қапастардағы жұмысшы пішінбіліктердің диаметрлері илемдеу бағытына қарай біртіндеп кішірейеді, ал тіреуші пішінбіліктердің диаметрі керісінше үлкейеді. Бұндай жағдай да пішінбіліктердің айналуын дербес муфта, редуктор, тістегершікті қапас пен айналдырғы арқылы жүзеге асырады. Айтылған жұмысшы және тіреуші пішінбіліктердің диаметрлері келесі формуламен анықталады (сәйкесті жазылған):

$$D_{i+1} = \frac{h_i \cdot D_i \cdot n_i (1 + s_i)}{h_{i+1} \cdot n_{i+1} (1 + s_{i+1})}; \quad D_{j-1} = \frac{h_j \cdot D_j \cdot n_j (1 + s_j)}{h_{j-1} \cdot n_{j-1} (1 + s_{j-1})}; \quad (i=1,2,\dots,N; \quad j = N,\dots,2,1),$$

мұндағы $h_i, h_j - i$ немесе j қапаста илемделетін жолақ қалыңдығы;
 n_i және $n_j - i$ немесе j қапас пішінбіліктерінің айналу жиілігі;
 $N -$ қапастың реттік номері;
 s_i және $s_j - i$ немесе j қапас пішін біліктерін металл шыққан кездегі озу;

D_i және D_j – алдыңғы қапастың жұмысшы i және тіреу j пішінбіліктерінің диаметрі.

Бір қапас пен екінші қапастың арасындағы жұмысшы пішінбіліктердің арасындағы ара қашықтығы берілген ара қашықтықпен салыстырғанда озу шамасына ұлғаятындығын айта кеткен жөн.

Бұранда тәрізді құралда және бойлық-сыналы орнақта (БСО) дайындаманы илемдеген кезде алюминий қорытпаларында құрылым түзілуін болжау үшін, бізге, берілген құрал пен орнақта жолақты деформациялағанда пайда болатын кернеулі-деформациялық күйді (ҚДК) зерттеу қажет болды. ҚДК есептеу үшін MSC. Super Forge мамандандырылған стандартты бағдарламасын пайдаландық.

Ұсынылып отырған құрал мен жабдықта жолақты илемдеу процесі өте күрделі процесс болып табылады. Бұл, құралдың құрама пішінің күрделілігімен және илемдеу бағытымен диаметрлері кішірейетін пішінбіліктер орналасқан бес қапасты орнақта дайындаманы үздіксіз деформациялаумен байланысты.

Модельдеудің алғашқы сатысында, "Inventor" бағдарламалық кешенін пайдалана отырып, бұрандалы пішінбіліктердің, бойлық-сына орнақтың және дайындаманың виртуалды көлемдік модельдерін құрдық.

Кейінірек бұрандалы пішінбіліктердің, бойлық-сыналы орнақтың және дайындаманың көлемдік виртуалды модельдерін MSC. SuperForge кешенінің CAE бағдарламасына импортадық және сәйкесіті түрде бағдарламаға енгіздік.

Бұрандалы пішінбілік пен бойлық-сыналы орнақта илемдеу процесін зерттеу үшін өлшемі 6x100x200 мм болатын тікбұрышты дайындаманы пайдаландық. Дайындаманы 4-түйінді элементтерге (СТЕТРА) бөліп жолақты илемдеуді үш өлшемді ортада модельдедік. Дайындама материалы ретінде АД31 алюминий қорытпасын қолдандық. Дайындама материалының илемділігін модельдеу үшін Джонсон-Кук серпімдіпластикалық моделін таңдадық. "MSC.SuperForge" бағдарламасының мәліметтер базасынан реологиялық қасиеттерді бердік.

Илемдеуді келесі режим бойынша жүзеге асырдық: 320 °С

температураға дейін қыздыру; төрт өтіммен бұрандалы пішінбіліктерде 5,9 мм қалыңдығына дейін илемдеу; салқындату; БСО-та бөлме температурасында 1,5 мм қалыңдыққа дейін илемдеу.

ҚДК есептеу үшін, ұсынылып отырған үлкейтілген зертханалық орнақтың жұмысшы қапастарының техникалық сипаттамаларын пайдаланылды. MSC. Super Forge кешенінде құралдар абсолютті қатты болып қабылданады және тек жылуөткізгіштік пен жылу беру қасиеттерімен қамтамасыз етіледі, яғни меншікті жылуөткізгіштік, меншікті жылусыйымдылық мен тығыздық ескеріледі, ал механикалық қасиеттер ескерілмейді. Материалдар мөлiметтері базасынан ШХ15 құрал материалын алдық. Бұл материал үшін тығыздық пен жылулық қасиеттерді бағдарламаның өзі белгілейді.

Қатты пішінбілік пен дайындаманың деформацияланатын материалы арасындағы өзара әрекеттесу, жанасу беттері көмегімен модельденді. Олар пішінбілік беті мен илемделетін жайма бетінің арасында жанасу шарттарын сипаттайды. Модельдеу процесінде, пішінбіліктің айналуы мен материалдың деформациясын кескіндеу үшін, жанасу шарттары үнемі жаңарып отырды. Бұл пішінбілік пен өңделетін дайындама материалы арасында сырғуды модельдеуге мүмкіндік береді. Пішінбілік пен жайма арасындағы жанасуды Кулон үйкелісімен модельдедік, үйкеліс коэффициенті 0,3 тең етіп қабылданды.

Илемдеу барысында температуралық режим пішінбілік, жайма және қоршаған орта арасында жылу алмасудан, сонымен қатар металдың деформациясы есебінен жылудың көтеруілінен тұрады. Илемдеу процесі бөлме температурасында өтетіндіктен, пішінбіліктің бастапқы температурасын 20 °С тең деп қабылдадық.

Металлографиялық талдауды үдемелі кернеуі 25 кВ болатын JEOL (Джеол) электронды-зондты микроталдағышында орнатылған JNCAENERGY (Ұлыбритания) энергодисперсті спектрометрдің пайдаланылуымен жүргіздік. JEOL құралының үлкейту аралығы 40-40000 есе дейін. Микроталдағыштың жұмыс істеу принципі: жоғарғы қуатты (25 кэВ) жіңішке (1 мкм)

электрондар сәуелесі үлгіге бағытталады, мұнда үлгіні сканерлеу арқылы растрға (кадр) бұрылады, бұл кезде үлгімен шығарылатын екіншілей электрондар тіркеледі. Алынатын сурет оптикалық фотосуреттерге өте ұқсас, алайда оптикалық суреттермен салыстырғанда электрондар сәуелесі өте жіңішке ($\approx 1-2$ мкм) болатындықтан, фокус тереңдігі ауқымды жоғары болады және пайдаланылатын үлкейту едәуір жоғары болып, үлгінің аса ұсақ құрылымдық құрамдастары ажыратылып көрінеді.

Ақаулы субқұрылым көрсеткіштерін сандық талдауды стандартты әдістермен жүзеге асырдық. Металлографиялық зерттеулер үшін тілімтастарды ажарлауыш пен өңдеу шарықтарында дәстүрлі әдістермен дайындадық. Микроталдау үлгілерін Келлер еритіндісімен химиялық өңдедік.

Жасалған жұмыста төменде келтірілген қадамдардан тұратын, деформациялау процестерін мультимасштабты модельдеудің танымал әдістемесі қолдандық [2-4]:

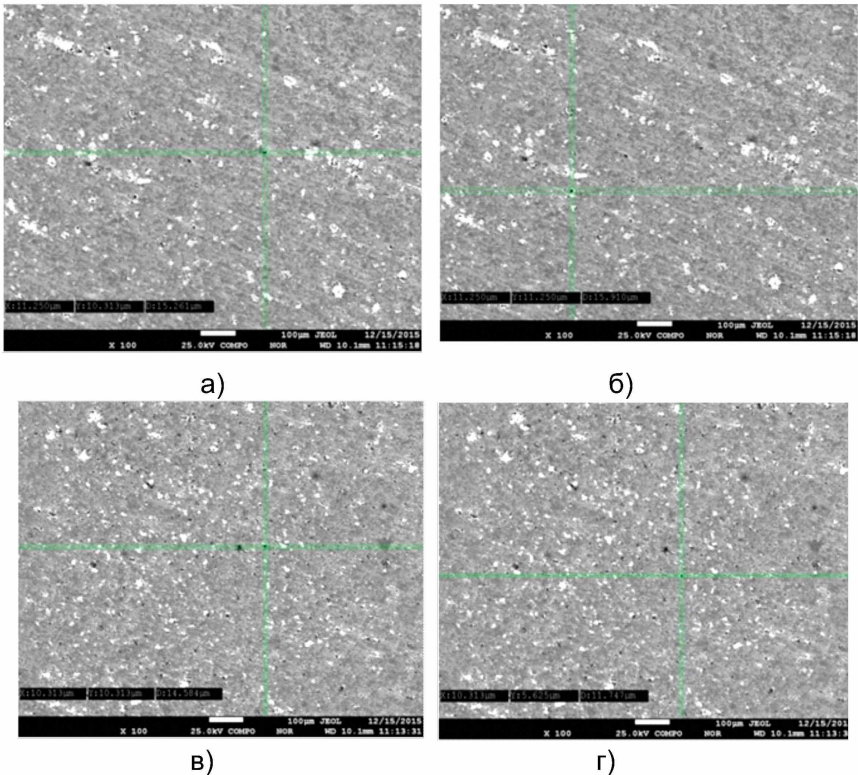
1. Өңделетін дайындаманы изотропты материал ретінде қабылдап дәстүрлі макро модель құрдық. Мультимасштабты модельдің деңгейлері арасында кернеулі-деформацияланған күйі жөнінде аса нақты ақпарат алуды қамтамасыз ету үшін, микродеңгейлі модельдің болашақ есептеу орындарында шеткі-элементтік тор сызықтарының орналасу тығыздығын ұлғайттық.

2. Микроқұрылымның көрнекі көлемін құру үшін зертханалық металлографиялық зерттеулер барысында алынған микроқұрылымның анық фотосуретін пайдаландық (сурет 2). Фотосурет өлшемін көрнекі көлемнің қажетті өлшеміне дейін түзеттік. Кейіннен графикалық редакторлар пайдалану арқылы берілген фотосуретті бинарлы, растрлы қара-ақ суретке түрлендірдік.

3. Алынған микроқұрылым суретін пайдаланылатын бағдарламалық кешенге геометриялық нысан ретінде еңгіздік және есептеу шеткі-элементтік тор сызықтарын түсірдік, ал дербес микроқұрылымдық құрамдастарына механикалық қасиеттер белгіледік.

4. MSC. SuperForge бағдарламалық кешенінің көмегімен алынған модель есебін жүргіздік.

Ұсынып отырған әдістемені қолданғанда, модельдеу сатыларын дәстүрлі ретпен орындаумен салыстырғанда, модель



Сурет 2. Өлшемі бойынша әртүрлі қосындылары бар Д16 алюминий қорытпасының микроқұрылымы: а-d = 15,261 мкм; б-d = 15,910 мкм; в-d = 14,584 мкм; д = 11,747 мкм

тұрғызу модулінде материал қасиеттерін белгілеуді жеке шеткі элементпен торсыздыққа бөлуден кейін жүзеге асырдық. Бұл құрылымның әртектілігі есебін шешуге және есептеу уақытын қысқартуға мүмкіндік береді.

"MSC. SuperForge" бағдарламасын іске қостық. Қадамдық әдіспен орын ауыстыруды, деформация, деформация жылдамдығы және кернеу тензорларының сыңарларын, деформация мен кернеу қарқындылығын, қалыпты қысым күшін, дайындама көлемі бойынша температуралардың таралуын есептедік.

Нәтижелер және оны талқылау

3 және 4 суреттерде төрт өтіммен бұрандалы пішінбілікте илемдеген кезде дайындамада деформация мен кернеу қарқындылықтарының таралу көрінісі көрсетілген. Дайындаманы қыздырудың температурасы 320 °С.

Алынған сандық модельдеудің нәтижелері негізінде мыналар аеықталды:

- илемдеудің бастапқы сәтінде кернеу мен деформация қарқындылықтары пішінбілік деңестерінің жұмысшы бетімен дайындаманың жанасу аймағында шоғырланады;

- бірлік жаншуды жоғарылатқан кезде, кернеу мен деформацияның қарқындылықтарының екпіні жанасу аймағынан, пішінбіліктердің деңестері мен ойыстарының жұмысшы бетіне еңкейіп орналасқан жолақтар аймағына ауысады (сурет 3 және 4);

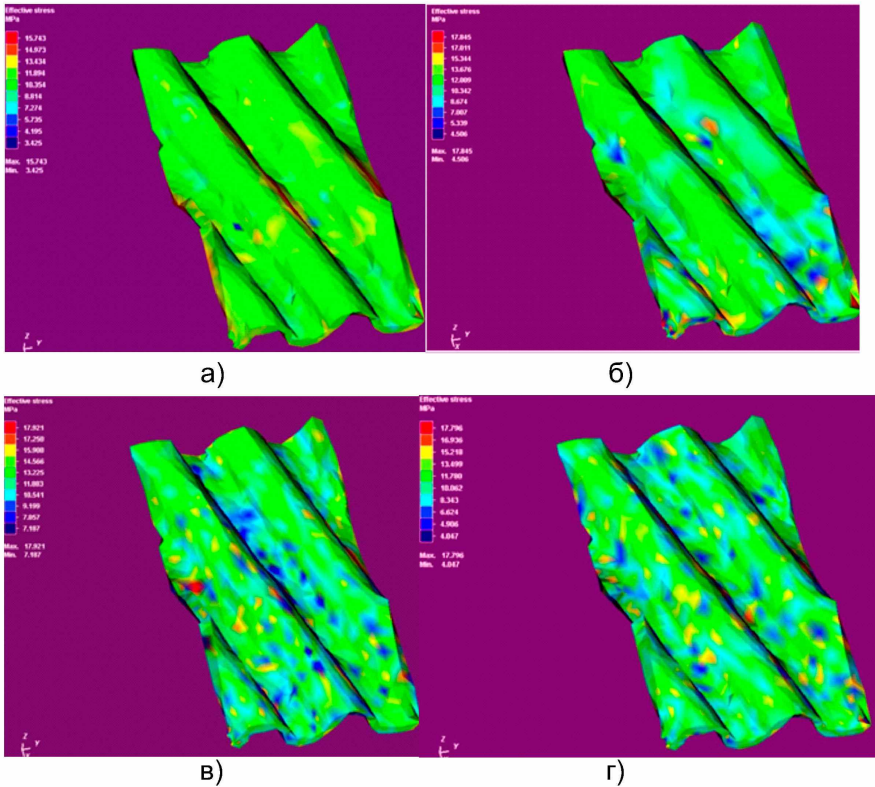
- бұрандалы пішінбіліктерде илемдеу процесінде, құралдың жолақпен жанасатын аймағы суытылады, бұл кезде иетін деформациялар әрекет ететін аймақтарда температура жоғарылайды;

- бұрандалы пішінбіліктерде илемдеудің екінші, үшінші және төртінші өтімдерінде кернеу мен деформация қарқындылықтарының мәндері, пішінбіліктің деңес және ойық жерлерінің доға тәрізді аймақтарының астында, жоғарылайды;

- жұмысшы бетінің деңестері мен ойықтарының өлшемдері бірдей, сонымен қатар төменгі пішінбіліктің деңестері мен ойықтарына, жоғарғы пішінбіліктің деңестері немесе ойықтары қарама-қарсы орналасатын пішінбілікте қалыңдығы кішкентай дайындаманы илемдеу, өлшемдерді өзгертпей, көп реттік илемдеумен қаңылтырды деформациялауға мүмкіндік береді;

- бұрандалы пішінбілікте жолақты илемдеудің жаңа әдісі, жолақты қарқынды ауыспалы таңбасы бар деформациямен илемдеуге мүмкіндік жасайды. Максималды мүмкін болатын ығысу, деңестер енінің ойықтар еніне қатынасы 0,8-0,9 тең болғанда жүзеге асады;

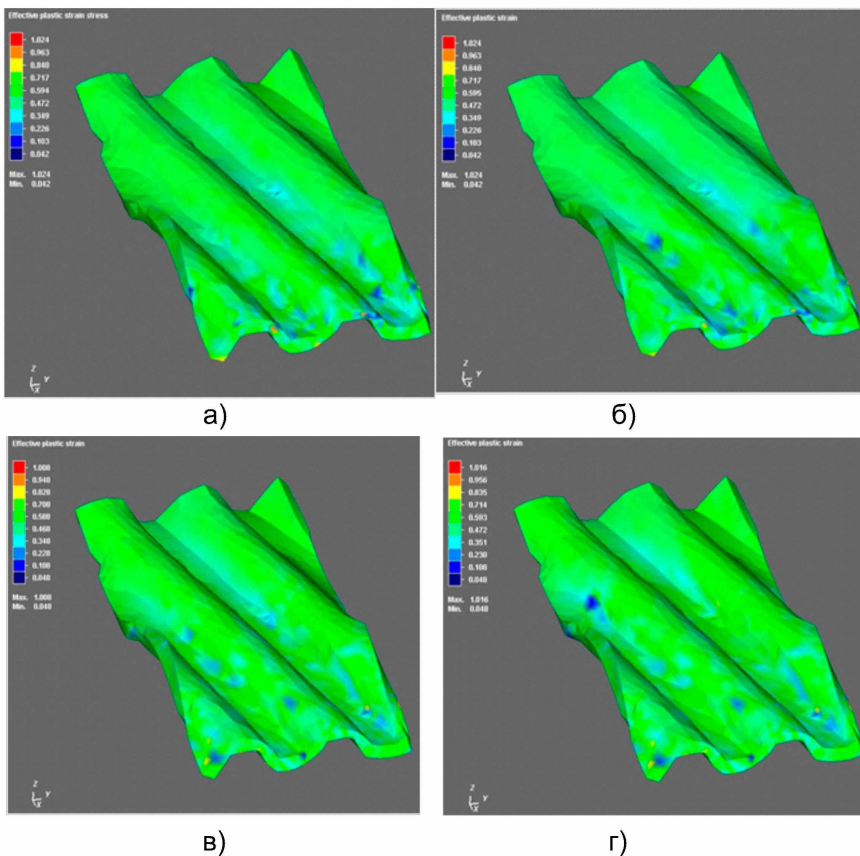
- қайта-қайта дайындаманы ию, ығысу деформация дәрежесінің мәнін ұлғайтуға мүмкіндік береді. Бұның бәрі қорытпа құры-



Сурет 3. Бұранда тәрізді пішінбіліктерде илемдеген кезде дайындамада кернеу қарқындылығының таралу көрінісі (илемдеу температурасы 320 °С): а) бірінші өтім; б) екінші өтім; в) үшінші өтім; г) төртінші өтім

лымын тиімді ұнтақтауға мүмкіндік береді, яғни алынатын жайма сапасын арттыруға мүмкіндік жасайды;

- қалыңдығы жұқа дайындаманы пайдалану және ауыспалы таңбасы бар июмен жолақты деформациялау жайманы алудың өнімділігін артыруға және еңбек шығынының азайтуға алып келеді. Бұндай кезде процестің энергокүштік көрсеткіштерін төмендетуге мүмкіндік жасалды;



Сурет 4. Бұранда тәрізді пішінбіліктерде илемдеген кезде дайындамада деформация қарқындылығының таралу көрінісі (илемдеу температурасы 320 °C): а) бірінші өтім; б) екінші өтім; в) үшінші өтім; г) төртінші өтім

• бұрандалы жұмысшы беті бар пішінбіліктермен жолақтарды илемдеген кезде түзілетін дөңестер мен ойықтар илемделетін жолақтың ені бойымен ығысады. Бұл дайындаманың қимасы бойымен қосымша макроығысуды тудырады және деформация қарқындылығының ұлғаюына әсер етеді;

- бұрандалы жұмысшы беті бар пішінбіліктермен дайындаманы илемдеген жағдайда деформация қарқындылығы мәнінің өсуі, цилиндрлік пішінбіліктерде илемдеумен салыстырғанда екі есе жоғары;

- бұрандалы жұмысшы беті бар пішінбіліктермен жолақтарды илемдеген кезде түзілетін дөңестер мен ойықтар илемделетін жолақтың ені бойымен ығысады. Бұл дайындаманың қимасы бойымен қосымша макроығысуды тудырады және деформация қарқындылығының ұлғаюына әсер етеді;

- бұрандалы жұмысшы беті бар пішінбіліктермен дайындаманы илемдеген жағдайда деформация қарқындылығы мәнінің өсуі, цилиндрлік пішінбіліктерде илемдеумен салыстырғанда екі есе жоғары;

- деформация қарқындылығының ұлғаюы жолақ қимасы бойынша тең осьті және біртекті ультраұсақтүйіршікті құрылымның түзілуіне әкеледі;

- әртүрлі құрылымдық құрамдастары (қоспалары) бар, алюминий қорытпаларынан жасалған жолақтарды илемдеу процесін модельдеуген кезде, қоспаларға тікелей жақын орналасқан жерлерде кернеу мен деформация қарқындылығының максималды мәндері жоғарылайды немесе төмендейді (сурет 3 және 4). Бұны қоспалардың механикалық қасиеттерінің мөлшерлерімен түсіндіруге болады. Яғни қосындылардың механикалық қасиеттерінің шамалары жолақ материалының механикалық қасиеттерінен жоғары немесе төмен болуымен айтылған құбылысты түсіндіруге болады;

- терт өтіммен бұрандалы пішінбілікте илемдеген кезде, қоспалар металдың иіліп деформациялауына кедергі жасайды немесе әсер етеді. Бұл дайындама материалының тұтастығын бұзуға алып келуі мүмкін (сурет 3 және 4).

Өңделетін дайындаманың беттік аймағында қоспаларды ауқымды орналастырып, бұрандалы пішінбілікте илемдеуді модельдесек және нәтижелерін талдасақ, онда қоспалар орналасқан аймақтарда кернеу қарқындылығы жоғарылайтындығын немесе төмендейтіндігін көреміз (сурет 3). Кернеу қарқындылығының осылай шоғырланауы, ұсынылып отырған пішінбілікте алю-

миний қорытпаларын илемдеген кезде дайындаманың кернеу күйі сұлбасының қаттылық коэффициентін, не "қатайтуға", не "жұмсартуға" алып келетіндігін болжауға болады.

Дайындаманың орталық бөлігінде орналасқан қоспалардың көп мөлшері де, дайындаманың берілген аймағында кернеу қарқындылығын жоғарлатуға немесе төмендетуге алып келеді.

Жайма құрылымында металл емес қоспалардың кездесуі, илемдеудің төртінші өтімінен кейін кернеу күйі көрсеткішін ауқымды үлкейтуге немесе кішірейтуге алып келеді. Бұл жағдайда жаймалаған жолақтың қирау мүмкіндігі бойлық-сыналы орнақта илемдеген кездегі кернеу күйі сұлбасына тәуелді болады.

5 және 6 суреттерде бойлық-сынала орнақта жолақтарды илемдеген кезде кернеу мен деформация қарқындылығының таралу көрінісі көрсетілген. Дайындаманы қыздыру температурасы 20 °С.

Кернеулі-деформациялы күйіді есептеп алған нәтиже мынандай мәліметтерді берді:

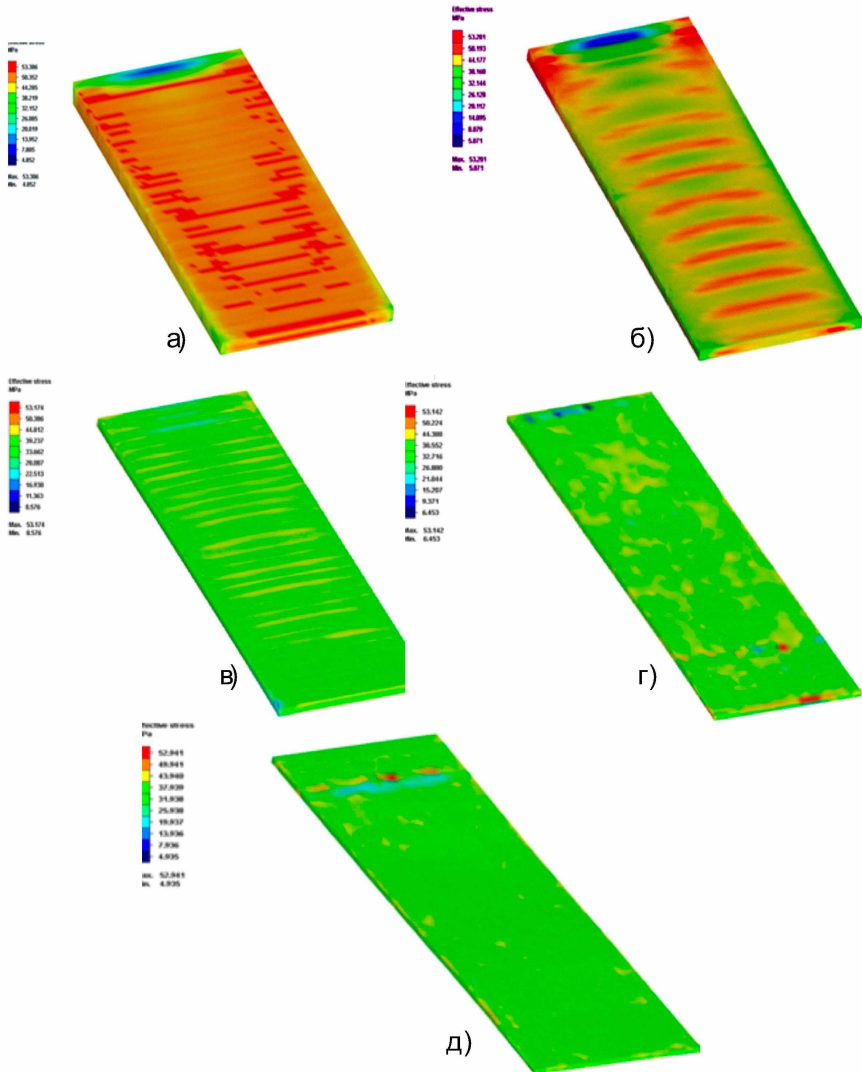
1) Бойлық-сыналы орнақтың бірінші қапасында илемдеген кезде кернеу мен деформацияның қарқындылығы металды пішінбілік қарпиды аймақтарда шоғырланады;

2) Жаншу үлкейген сайын кернеу мен деформация қарқындылықтарының мәндері, деформацияланатын дайындама ортасында немесе шетінде үлкейеді;

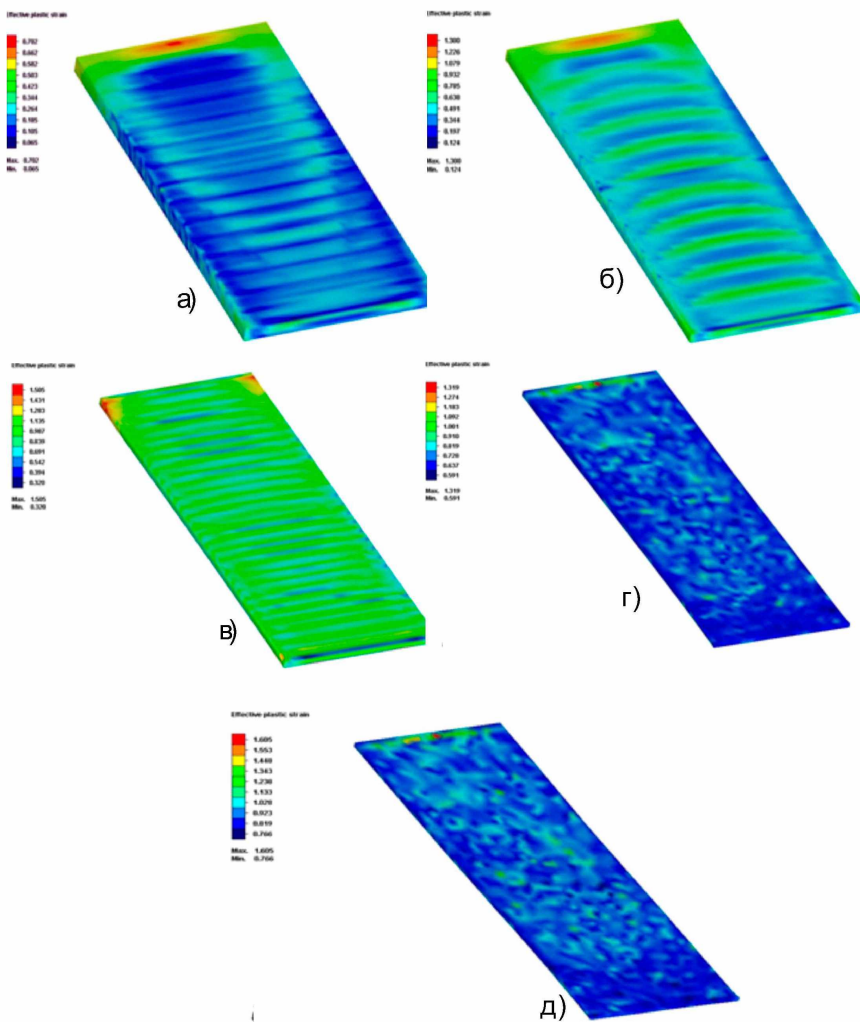
3) Бойлық-сыналы орнақтың келесі қапастарында дайындаманы деформациялаған кезде, деформация қарқындылығының жиналған аймағын, дайындаманың бетке аймақтарынан орталық қабаттарына қарай біртіндеп ауыстырады және кейіннен жолақтың барлық ұзындығы бойымен біркелкі деформациялауға мүмкіндік береді (сурет 5 және 6);

4) Орнақ қапастары бойынша деформация мен кернеу қарқындылықтарының біркелкі таралуы, деформация ошағы бойынша ығысу деформациясы қарқындылығын (жинақталған деформацияны) біркелкі таратуға мүмкіндік жасайды;

5) Илемделетін жолақтың биіктігі мен ұзындығы бойынша жинақталған деформацияның аса біркелкі таралуы бірінші қапаста 20 %, екінші қапаста 20 %, үшінші қапаста 20 %, төртінші қа-



Сурет 5. Бойлық-сыналы орнақта илемдеген кезде дайындамада кернеу қарқындылығының таралу көрнісі (илемдеу температурасы 20 °С): а) бірінші қапас; б) екінші қапас; в) үшінші қапас; г) төртінші қапас; д) бесінші қапас



Сурет 6. Бойлық-сыналы орнақта илемдеген кезде дайындамада деформация қарқындылығының таралу көрінісі (илемдеу температурасы 20 °С): а) бірінші қапас; б) екінші қапас; в) үшінші қапас; г) төртінші қапас; д) бесінші қапас

паста 15 %; бесінші қапаста 10 % бірлік жаншумен илемдеген кезде алынды;

6) Бойлық-сыналы орнақтың қапастарында илемдеген кезде деформация шоғырланған аймақтарда температура жоғарылайды;

7) БСО-ның қапастарында илемдеу барысында салыстырмалы жоғары температурасы бар металдың аймақтары деформация ошағымен бірге орын ауыстырады;

8) Бойлық-сыналы орнақта әртүрлі құрылымдық құрамдас-тары (қоспалары) бар алюминий қорытпаларынан жасалған жолақтарды илемдеген кезде, жайма қоспаларына тікелей жақын орналасқан аймақтарда кернеу мен деформация қарқындылығы мән-дері аз ғана жоғарылайды немесе төмендейді жүреді (сурет 5 және 6).

Қортынды

1. Алюминий қорытпаларын бұрандалы пішінбіліктер мен бойлық-сыналы орнақта илемдеу процесінде, ҚДК есептеу уақытын қысқартуға және құрылымның әртектілігін ескеруге мүмкіндік беретін, материал қасиеттерін белгілеу дербес шеткі элементтермен жүзеге асырылатын, шекаралық шарттарды дұрыс құрудан тұратын шеткі элементтік модельдеу әдістемесі жасалды.

2. Құрылымның әртектілік көрсеткіштерінің ескерілуімен, бұрандалы пішінбіліктерде және бойлық-сыналы орнақта илемдеу процесін шеткі элементтер әдісімен модельдеуді жүргізіп, пішін өзгеру процесінде алюминий қорытпасы жаймаларының зақымдалуына, қосындылардың көлемдік үлесі, түрі және дайындаманың қимасы бойымен орналасуы әсер ететіндігі және қосындылардың механикалық қасиеттерінің мәніне байланысты кернеу мен деформация қарқындылығының максималды немесе минималды мән-дері қосындыларға жақын орналасқан аймақтарда шоғырланатыны дәлелденді.

Мақала қаржыланатын №757 МОН.ГФ.15.ЭМ4: "Жоғары сапалы жұқа жолақтарды илемдеуге арналған көпқызметті үздіксіз

бойлық-сыналы орнақтың жаңа конструкциясын жасау" тақ ырыбы бойынша жазылған.

Әдебиеттер

1 *Yang Wang, Yuanxin Zhou, Yuanming Xia.* A constitutive description of tensile behavior for brass over a wide range of strain rates // *Materials Science and Engineering A* 2004, 372. – P. 186-190.

2 *Бунова Г.З., Воронин С.В., Гречников Ф.В., Юшин В.Д.* Компьютерное моделирование процесса вытяжки полых стаканчиков из сплава АМг₆ с учетом реальной структуры материала // *Изв. Самарск. науч. центра Рос. акад. наук.* – 2009. – Т. 11, № 1-3. – С. 219-224.

3 *Константинов Д. В., Бзовски К., Корчунов А. Г., Пьетчшек М.* Моделирование процессов осесимметричного деформирования с учетом микроструктуры металла // *Компьютерные исследования и моделирование.* – 2015. – Т. 7, № 4. – С. 897-908.

4 *Генкин А.Л.* Моделирование и оптимизация процесса горячей прокатки полос. – М.: Ленанд. 2012. – 168 с.

5 *Гук С.В., Смирнов О.М., Кавалла Р.* Неравномерность деформации компонентов микроструктуры многофазных сталей при оценке предельной формуемости листового металла // *Металлург.* – 2006. – № 5. – С. 29-32.

6 *Константинов Д.В., Корчунов А.Г.* Мультимасштабное компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // *Вестн. Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова.* – 2015. – № 1. – С. 36-43.

7 *Brands S., Schroder J., Balzani D.* Statistically similar reconstruction of dual-phase steel microstructures for engineering applications // *Proc. CMM-2011 Computer Methods in Mechanics, Warsaw (CD ROM).*

8 *Matusiewicz P., Czarski A., Adrian H.* Estimation of materials microstructure parameters using computer program Sigma Scan Pro // *Metallurgy and foundry engineering,* 2007. – P. 33-40.

9 *Бойко А. Б.* Совершенствование методики расчета напряженно-деформированного состояния в процессе волочения на основе учета неоднородности структуры металла: автореф. дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук. – Магнитогорск: Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2015. – 112 с.

10 *Чуистов К.В.* Старение металлических сплавов. - Киев: Академперіодика, 2003.- 568 с.

11 *Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И.* Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учеб. для студ. высш. уч. завед. / 4-е изд. - М.: МИСиС, 2005. - 432 с.

12 *Мясникова А.А.* Неметаллические включения и их влияние на качество сварных соединений при дуговой сварке // *Master's Journal*. – 2012. – № 1. – С. 50-54.

13 *Besson J.* Continuum Models of Ductile Fracture: A Review // *International Journal of Damage Mechanics*. – 2010. – Vol. 19. – P. 3-52.

14 *Белов Н.А.* Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов: – М.: Изд. Дом МИСиС, 2010. – 511 с.

15 *Барышников М.П., Бойко А.Б., Чукин М.В.* Анализ возможности расчета упругих характеристик металлов и сплавов на основе представления их структуры как несплошной среды // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: межрег. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Салганика. – Магнитогорск: МГТУ. – 2011. – С. 200-206.

16 *Кристал М.М.* Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналит. обзор). Ч. 1. Феноменология зуба текучести и прерывистой текучести // *Физическая мезомеханика*. – 2004. – № 7, 5. – С. 5-29.

17 *Сергеев Ю.Г.* Материаловедение. Технология конструкционных материалов. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2010. – 312 с.

16 *Панин В.Е., Гриняев Ю.В.* Физическая мезомеханика – новая парадигма на стыке физики и механики деформируемого твердого тела // *Физическая мезомеханика*. – 2003. – № 6. – С. 9-36.

18 *Машеков А.С., Турдалиев А.Т., Смагулова Н.К. и др.*. Способ получения сверхпластичного листа из алюминиевого сплава: Патент РК № 30450 / Оpubл. 15.10.2015 // Бюл.№ 10.

19 Патент РК № 31750. Многофункциональный продольно-клиновый стан для прокатки листов из стали и сплавов // С.А. Машеков, Б.Н. Абсадыков, Е.З. Нугман и др. // Оpubл. 30.12.2016 // БИ. – 2016. – № 18.