

S.A. Mashekov<sup>1</sup>, B.N. Absadykov<sup>2</sup>, M.M. Akimbekova<sup>1</sup>,  
E.A. Tusupkaliyeva<sup>1</sup>, M.R. Maulenova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty;

<sup>2</sup>A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences, Almaty  
[mashekov.1957@mail.ru](mailto:mashekov.1957@mail.ru), [b\\_absadykov@mail.ru](mailto:b_absadykov@mail.ru)

## FINITE ELEMENT MODEL OF ELASTO-PLASTIC DEFORMATION OF SHEET METAL IN CORRUGATED ROLLS AND LONGITUDINAL-WEDGE MILL

**Annotation.** This article describes the current state and methodological features of numerical modeling of the processes of processing of metal by pressure, the main problem points of traditional methods are identified. The problematic issues of mathematical modeling and, therefore, the study of the strain-deformation state of the processes of metal processing by pressure are analyzed. This article provides a defining system of equations for describing the processes of warp deformation in screw-shaped rolls and a longitudinal-wedge mill, and the finite element method of its solution. The main stages of creating a finite element model in the MSC.Super Forge software package are described, as well as a method that allows us to predict the deformation distribution in the volume of the deformable metal taking into account the microstructure features.

**Keywords:** processing of metal by pressure, rolling, screw-shaped rolls, longitudinal-wedge mill, finite element method, deformation intensity, stress intensity, temperature.

С.А. Машеков<sup>1</sup>, Б.Н. Абсадыков<sup>2</sup>,  
М.М. Акимбекова<sup>1</sup>, Э.А. Тусупкалиева<sup>1</sup>, М.Р. Мауленова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан;

<sup>2</sup>Ә.Б. Бектұров атындағы Химияғылымдары институты, Алматы қ., Қазақстан

## БҰРАНДАЛЫ ПІШІНБІЛІК ПЕН БОЙЛЫҚ-СЫНАЛЫ ОРНАҚТА ТАБАҚТЫ-МЕТАЛДЫ СЕРПІМДІ ПЛАСТИКАЛЫҚ ДЕФОРМАЦИЯЛАУДЫҢ ШЕТКІ-ЭЛЕМЕНТТІК МОДЕЛІ

**Аннотация.** Мақалада металдарды қысыммен өңдеу процестерін сандық модельдеудің қазіргі уақыттағы жағдайы және методологиялық ерекшеліктері жазылған. Дәстүрлі әдістемелердің негізгі мәселелері көрсетілген. Металдарды қысыммен өңдеу процестерін математикалық модельдеудің, осымен бірге кернеулі-деформациялы күйді зерттеудің мәселелері талқыланған. Мақалада бойлық-сыналы орнақ пен бұрандалы пішінбілікте дайындаманы деформациялауды бейнелеу үшін қолданылатын анықтаушы теңдеулер жүйесі және осы теңдеулерді шешетін шеткі элемент әдістемесі келтірілген. MSC.Super Forge кешенді бағдарламасында шеткі-элементтік модельді құрудың негізгі сатылары, ал тағы да микроқұрылымды ескеріп деформацияланатын көлемде деформацияның таралуын болжауға мүмкіндік беретін әдістеме бейнеленген.

**Түйін сөздер:** металдарды қысыммен өңдеу, илемдеу, бұрандалы пішінбілік, бойлық-сыналы орнақ, шеткі элемент әдісі, деформация қарқындылығы, кернеу қарқындылығы, температура.

Металдарды илемдеген кезде жайма материалдарының кернеулі-деформацияланған күйін (КДК) есептеу үшін аналитикалық әдістерді қолданудың шектері бар. Ең бастысы, оларға өзара әрекеттесетін нысандар геометриясының күрделілігін, пайдаланылатын материалдар қасиеттерінің сызықты болмауын, сонымен қатар, беттердің жанасып әсерлесуінің ерекшеліктерін ескеру қажеттілігін жатқызуға болады. Сондықтан, металдарды қысыммен өңдеу (МҚӨ) есептерін шешу үшін сандық әдістерді қолдану кең таралымға ие болды, мәселен – шеткі элементтер әдісі.

Бұл әдістің мәніне стандартты элементтерді қолданып тұтас ортаны дискретті бейнелеуді жатқызады [1]. Осы стандартты элементтер үшін күш пен деформация арасындағы өзара байланысты орнататын пішінөзгерту функциясы белгілі. Бір нысан элементтері өзара түйін нүктелерінде байланысқан, олар жақын элементтер үшін ортақ болып табылады. Шешімін табудың барлық қажетті шекаралық шарттарын бергеннен кейін, бар еркіндік дәрежелері бойынша барлық түйін нүктелерінің орын ауысуын сипаттайтын дербес туындылардың дифференциалдық теңдеулер жүйесі құрылады және шешіледі, оған қоса нысанның кернеулі-деформацияланған күйі анықталады.

Жалпы жағдайда, шеткі элементтер әдісін (ШЭӘ) қолданып металдарды қысыммен өңдеудің КДК есептеу келесі негізгі сатылардан тұрады [1]:

1. Зерттеу нысанының геометриясын тұрғызу (қойылған мақсатқа байланысты екіөлшемді немесе үшөлшемді);

2. Бастапқы деректерді беру (пайдаланылатын шеткі элементтер түрін және қасиеттерін таңдау, материалдар қасиеттерін беру);

3. Зерттеу нысанының шеткі элементтік моделін құру (шеткі элементтер торы түрінде геометриялық модельді ұсыну);

4. Модельдің жүктелуі мен бекітілуінің шекаралық шарттарын беру (жүктемелерді түсіру, модель түйіндеріне берілген еркіндік дәрежелері бойынша орын ауыстыруларға шектеу қою, модель элементтері арасында түйісу және басқа өзара әрекеттесудің түрлерін теңдеулермен сипаттау);

5. КДК есептеу (қолданылатын есеп шешкіштің түрі мен қасиеттерін беру және есепті шешудің жүрісін анықтайтын басқакүйге келтірушілерді беру. Есептеу автоматты түрде жүргізіледі).

Жұмыстың алғашқы сатыларының бірі болып зерттелетін нысанның геометриясын құру саналады. Өйткені, КДК көрсеткіштерін және деформацияланатын дайындаманы құратын элементтердің жүктелуін зерттеген кезде геометрия аса маңызды мәнге ие болады (нысанның құрылымдық ерекшеліктерін геометриялық әртүрлі бейнелеу, әртүрлі кернеу концентрацияларын тудырудың нәтижесінде КДК параметрлерін есептеудің әртүрлі нәтижесіне алып келеді).

Пішіні әртүрлі пішінбіліктерде илемдеген кезде пайда болатын металл ағысы стационарлы процесс болып табылмайды. Өйткені үйкеліс жағдайы үнемі өзгеріп отырады. Бұл есепті екі өлшемді деформацияға келтіруге мүмкіндік бермейді, яғни үш өлшемді математикалық модельжасау талап етеді. MSC.Super Forge бағдарламасын қолданып құрылымы күрделі пішінбіліктерде жолақтарды илемдеуді зерттеу үшін жасалған модельдер, күрделі пішіні бар құралмен шектелген көлемдегі үлкен пластикалық деформацияларды ескереді.

*Анықтауыш теңдеу жүйесі.* Осы жұмыстатабақты металды бұрандалы пішінбілік пен бойлық-сыналы орнақта илемдеген кезіде пайда болып, динамикалық өзгеретін КДК анықтау қажет болды. КДК есептеу үшін келесі функцияларды пайдаланамыз [2,3]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sigma_{ij}(x, y, z, t); \\ x &= x(x_0, y_0, z_0, t); \\ y &= y(x_0, y_0, z_0, t); \\ z &= z(x_0, y_0, z_0, t); \\ \rho &= \rho(x, y, z, t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

мұндағы  $x_0, y_0, z_0, x, y, z$  – деформацияланатын дененің материалдық нүктесінің бастапқы және ағымдық координаталары;  $\rho$  – тығыздығы;  $t$  – уақыт.

Осы шамаларды анықталатын механикалық айнымалылар деп атайды. Оларды уақыттың кез-келген мезетінде деформациялау ошағында табады.

(1) функцияларымынандай қозғалыс пен үзіксіздіктің дифференциалдық теңдеулерімен байланысқан [2,3]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij,j} + \rho g_i &= \rho \omega_i; \\ \frac{d\rho}{dt} + v v_{i,j} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(2) формуласы он белгісізді ( $\sigma_{ij}$  үшін алты,  $\omega_i$  үшін үш, оған қоса тығыздық  $\rho$ ) байланыстыратындықтан, тұтас орталар механикасының математикалық әдістерімен оларды шешу қиынға соғады.

Меншікті масса күштері  $g$  мен үдеу  $\omega$  мәндері МҚӨ көптеген процестерінде жеткілікті аз мәндерге иемденген және оларды ескермеуге болады. Сонда (2) формуланы келесі тепе-теңдік дифференциалдық теңдеуіне түрлендіруге болады [2,3]:

$$\sigma_{ij,j} = 0. \quad (3)$$

(1) теңдеулер жүйесін шешу үшін алты теңдеу жетіспейді. Бұл теңдеулерді илемдеу теориясында деформацияланатын металл қасиеттеріне байланысты анықтайды. Илемдеу теориясында бұл алты теңдеуді КДК физикалық байланыс теңдеуі деп атайды [2,3].

Кернеу мен деформация жылдамдығы девиаторларының сыңарлары көптеген жағдайда пропорционалды байланыста болатындығы илемдеу теориясынан белгілі [2,3]. Пластикалық деформация теориясында мұндай пропорционалдылықты кернеу мен деформация жылдамдығы девиаторларының пропорционалдығы деп атайды.

Кернеу мен деформация жылдамдығы девиаторларының пропорционалды байланыс болжамын пайдалана отырып, келесі формуланы жазуға болады [2,3]:

$$D_\sigma = \psi D_\xi; \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = \psi \left( \xi_{ij} - \frac{1}{3} \xi \delta_{ij} \right), \quad (4)$$

мұндағы  $\psi$  – скалярлы көбейткіш.

Скалярлы көбейткіштің  $\psi$  шамасын келесі қатынастың көмегімен анықтауға болады [2,3]:

$$\psi = 2T/H, \quad (5)$$

мұндағы  $T$  – жанасу кернеуінің қарқындылығы;  $H$  – ығысу деформациясы жылдамдығының қарқындылығы.

Жоғарыда айтылғандар негізінде, илемделетін дайындаманың КДК есептеу үшін мыналарды анықтау қажет [2,3]: деформация ошағының әрбір нүктесінде бөлшектің қозғалу траекториясы; деформациялау және кернеу күйлерінің көрсеткіштері. Кернеу мен деформация тензорларының және деформация жылдамдығы тензорының алты сыңары, ағыс жылдамдығы векторының үш сыңары деформацияланатын дайындаманың КДК сипаттайтындығы жоғарыда келтірілген жұмыстардан белгілі.

Илемдеудің серпімдіпластикалық есептерін шешкен кезде, массаның, импульс пен энергия сақталу заңдарының салдарынан пайда болатын теңдеулер жүйесін пайдаланады. Координаттардың декарттық жүйесінде тензорлық түрде қолданылатын негізгі теңдеулер келесі түрге иемденді [2,3]:

деформацияның үзкісздік теңдеуі:

$$\frac{dS}{dt} + \nu v_{i,j} = 0; \quad (6)$$

көлем тұрақтылығының шарттары:

$$V_0 \rho_0 = V \rho; \quad (7)$$

қозғалыс теңдеуі:

$$\rho \dot{v}_i = \sigma_{ij,j}; \quad (8)$$

жылуөткізгіштік теңдеуі:

$$\gamma \Delta \theta + TH + \sigma \xi = c \rho \frac{d\theta}{dt}; \quad (9)$$

кинематикалық қатынастар:

$$\xi_{ij} = 1/2(v_{i,j} + v_{j,i}); \quad (10)$$

сығылмаушылық теңдеуі

$$v_{i,i} = 0, \quad (11)$$

Мұндағы (----- $\gamma$  – жылуөткізгіштік коэффициенті;  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  – Лаплас дифференциалдық операторы;  $\theta$  – деформацияланатын дененің материалдық бөлшегінің температурасы;  $c$  – меншікті массалық жылусыйымдылық;  $\sigma_{ij}$  – кернеу тензорының сыңарлары:  $\sigma_{ij} = -\delta p + s_{ij}$ , мұндағы  $p$   $p = p(\rho, e)$  функциясы ретінде анықталады.

Мизес аққыштығының шарттары орындалған кезде, қатты дененің серпімдіпластикалық ағысын Прандтль – Рейс түріндегі физикалық қатынастармен былай бейнелеуге болады [4]:

$$\dot{s}_{ij} + \lambda s_{ij} = 2\mu \left( \xi_{ij} - \frac{\xi_{ij} \delta_{ij}}{3} \right), \quad (12)$$

$\lambda > 0$  мәнінде деформация пластикалық күйде болады,  $\lambda = 0$  мәнінде - деформация серпімді күйде болады.

(1 – 12) теңдеулерінде келесі белгілер пайдаланылған[2,4]:  $\sigma_{ij}$ ,  $s_{ij}$ ,  $\xi_{ij}$  – кернеу тензорының, кернеу девиаторының және деформация жылдамдығы тензорларының сыңарлары (сәйкесті жазылған);  $p$  – қысым;  $V$  – көлем;  $\rho$  – тығыздық;  $\delta_{ij}$  –Кронекер символы;  $i, j$  индекстерінің әрқайсысы ретпен 1, 2, 3 мәндерін қабылдайды. Уақыт бойынша туындыны айнымалының үстіне қойылған нүкте білдіреді. Сәйкесті кеңістікті айнымалы бойынша туындыны төменгі индекстер арасындағы үтір білдіреді.

Жоғарыда келтірілген жүйені реологиялық теңдеу аяқтайды. Ол деформация кедергісін деформация дәрежесімен, деформация жылдамдығымен және температурамен байланыстырады:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\varepsilon_{\text{экв}}, \xi_{\text{экв}}, \theta), \quad (13)$$

мұндағы  $\bar{\sigma}$ ,  $\varepsilon_{\text{экв}}$ ,  $\xi_{\text{экв}}$  –эквиваленттік кернеу, деформация және жылдамдық дәрежесі (сәйкесті жазылған).

Құрал беті бойымен металдың сырғуы жүретін беттік аймақта, шекаралық шарттар аралас болып табылады. Мұнда материалдың жылдамдығы өткізбеушілік шартын, ал пайда болатын кернеулер – үйкеліс шартын қанағаттандыру қажет. Өткізбеушілік шарты келесі түрде көрсетіледі:

$$v_j n_i = 0, \quad (14)$$

яғни жылдамдық векторының  $v$  беттің нормаліне  $n$  проекциясы нөлге тең.

Жасалған модельде үйкелісті ескеру үшін, А.Н.Леванов ұсынған және тәжірибеде тексерілген үйкеліс заңы қолданылады [5]:

$$F_t = m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \left( 1 - e^{-1,25(\sigma_n/\bar{\sigma})} \right), \quad (15)$$

мұндағы  $F_t$  – үйкеліс кернеуі;  $m$  – үйкеліс факторы;  $\sigma_n$  – қалыпты жанасу кернеуі;  $\bar{\sigma}$  – деформация кедергісі.

Сонымен қатар, дайындаманың жылулық процестері де модельденеді. Деформациялаған кездегі дайындаманың температуралық өрісін есептеу үшін пішінөзгертудің алдындағы дайындамада жылудың таралуын, яғни бастапқы жылулық шекаралық шарттарды білу қажет. Жылуөткізгіштік теңдеуі үшін шекаралық жылулық шарттар мынандай түрде беріледі: конвективті жылуалмасу мен бос бетте сәулеленумен жылу беру; үйкелісетін металл мен құралдың жанасатын бетінде жылу бөлінуді ескеріп, құрал мен металл жанасқан кездегі беттік жылуалмасу.

Жалпы алғанда, 3 өлшемді ағыста кернеу, деформация мен деформация жылдамдығы тензорының барлық сыңарлары нөлге тең емес екені белгілі. Сондықтан есептелуі қажет. Алайда, кернеу, деформация мен деформация жылдамдығының тензорлары визуалды елестетуге (визуалдауға) қиын нысан болып келетіндіктен, тәжірибелік мақсатта кернеу, деформация мен деформация жылдамдығының қарқындылықтары сияқты қарапайым көрсеткіштерді пайдаланған. Кейбір жағдайларда бұл шамаларды нәтижелі кернеу, деформация және деформация жылдамдығы

деп атайды. Бөл мөлшерлер өздеріне кернеу, деформация мен деформация жылдамдығының барлық сыңарларын кіргізіп, келесі формулалармен анықталады:

$$\sigma_{эке} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 - (\sigma_1 - \sigma_3)^2}; \quad (16)$$

$$\varepsilon_{эке} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 - (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}; \quad (17)$$

$$H_{эке} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\xi_1 - \xi_2)^2 + (\xi_2 - \xi_3)^2 - (\xi_1 - \xi_3)^2}. \quad (18)$$

Аталған нәтижелі кернеулер мен деформациялар, кернеулер мен деформациялардың барлық сыңарларының мөлшерін көрсететін кешенді көрсеткіш болып саналады. Бұл көрсеткіштер үйкеліссіз қарапайым қысқан кездегі бір осьтік деформацияға сәйкес келеді. Осыған ұқсас визуалдау моделінде деформация жылдамдығы нәтижелі деформация жылдамдығы түрінде көрсетілген. Ол нәтижелі деформацияның туындысы болып саналады және 1/с өлшенеді.

Аққыш шектің аналогы болып табылатын ағыс кернеуі, әдетте үш көрсеткіштен тәуелді болады: деформация, деформация жылдамдығы және температура. Айтылған кернеу кесте түрінде МПа-мен беріледі және зерттелетін материалдың беріктену қисық сызығы болып танылады. Осы кернеуге әсер ететін көрсеткіштер дайындама көлемінде әркелкі таралатындықтан, ағыс кернеуі де әркелкі болады. Модель тағы да орташа кернеудің сыңарларын былай есептей алады:

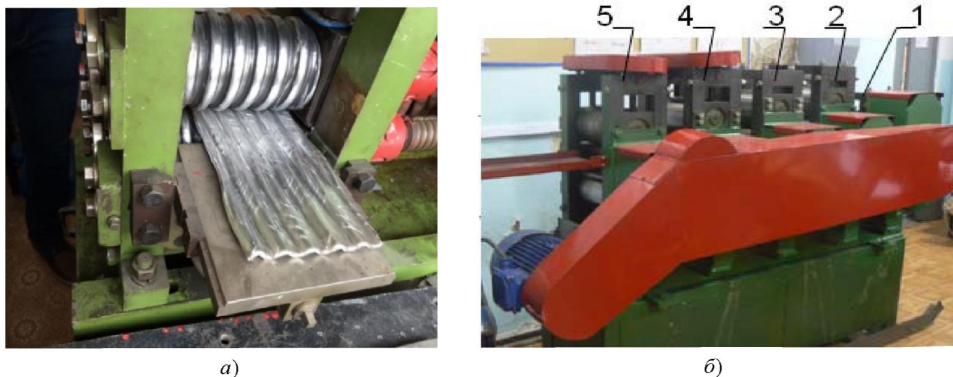
$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}. \quad (19)$$

Математикалық модельдеу алынатын мәліметтің жоғары дәлдігіне қол жеткізді. Алайда өңдеудің аз зерттелген процестерін талдағанда, осы процесті модельдеуге ғана сенім арту дұрыс шешім болып табылмайды. Екінші жағынан тәжірибелік құрамдасты, модельдеу нәтижелерін растау немесе жоққа шығару, ал тағы да зерттелетін технологиялық өңдеудің соңғы нәтижелерін талдау деңгейіне дейін қысқартуға болады.

Жоғарыда көрсетілген артықшылықтырды ескеріп, МҚӨ операцияларын талдағанда кеңінен қолданылатын шеткі элементтер әдісін қолданып, бұрандалы құралда [6] және бойлық-сыналы орнақта [7] жолақтарды илемдеу процесін зерттеу жөнінде шешімді қабылдадық (сурет 1).

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  $45^\circ - 60^\circ$  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  $\Delta h_B$  - бұрандалы жұмысшы беттер дөңестерінің биіктігі немесе ойықтарының тереңдігі;  $H_o$  - дайындаманың бастапқы биіктігі). Мұндай құралда илемдеген кезде, дайындаманың бойлық және көлденең қималарында таңбасы айнымалы иілудеформациясы 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.



1, 2, 3 –баскыш механизмдері жоқ қапастар; 4, 5– баскыш механизмдері бар қапастар  
Сурет 2.1 – Бұрандалы құрал орнатылған ДУО илемдеу орнағы (а) және бойлық-сыналы орнақ (б)

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):

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

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 пішінбіліктерінен 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.

Шеткі элементтер әдісімен есептеуді жүзеге асыратын бағдарламалық кешендер қазіргі уақытта кеңінен таралымға ие болды. Олардың арасында аса танымал, сонымен қатар ірі кәсіпорындарында кеңінен қолданылатын MSC.SuperForge кешені болып табылады. Ол МҚӨ операцияларын модельдеу үшін арнайы жасалған және өндірісте, ғылыми қызметте өз қолданысын тапты [8].

MSC.SuperForge бағдарламалық кешенінде шеткі-элементтік модель құрудың негізгі сатыларын талдайық. Есептеу техникасы құралдарымен іске асырылаын шеткі элементтер әдісінің мүмкіндіктері, инженерлер мен ғалымдардың жұмысшы құралдар санын кеңейтті. Алайда шеткі-элементтік модель мен зерттеу нысаны арасындағы айырмашылықты, сонымен қатар қолданылатын бағдарламалық кешенде жүзеге асырылған есептерді шешу алгоритмінің ерекшеліктерін ескеру қажет. Осылайша, зерттеушінің басты міндеті болып, зерттелінетін нысан жөнінде терексерілген және өзекті деректерді дайындау және өңдеу процесінің мүмкіндігінше ықшамдалған және онтайландырылған моделін құру саналады.

Бұрандалы пішінбілік пен бойлық-сыналы орнақта жолақты илемдегенде дайындамада пайда болатын КДҚ өзгерісін модельдеу, ресурсты көп қажет ететін процесс болып табылады. Бұл жағдайда соңғы нәтижеге, дұрыс дайындалған өңдеудің шеткі-элементтік моделі әсер етеді. Бұрандалы пішінбілікте илемдеу барысында металдың деформациясы белгілі бір деформация ошағында дайындаманың иілуімен жүреді. Оған қоса, дайындама деформация ошағында қара-

пайым ығысумен деформацияланады. MSC.Super Forge бағдарламалық кешені бойынша танымал әдебиет [8] негізінде MSC.Super Forge препроцессорын күйге келтіру мен деректер дайындаудың негізгі сатылары тұжырымдайық.

*Дайындама мен құрал моделін дайындау.* Илемдеу процесінің талданатын принципалды сұлбасы, әбзелді жобалау үшін қиындықтар тудырмайды. Дайындама мен құралдар пакеті қарапайым геометриялық пішіндерден тұрады және бастапқы деңгейде олардың арасындағы барлық өзара әрекеттесулерді жазық дайындама беті мен ойықжерлері бар құралдың жанасуы тәрізді сипаттауға болады. Осыған сәйкес, дайындама мен құралдың жанасатын ауданы иетін құрал бетінің ауданынан кіші болады. Бұл есептеу кешені үшін жасалатын модель нысанына қосымша шарттарды жүктейді.

Мысалы, визуалды болса да, құрал тұрғызу кезінде оның беті толқынды болып көрінеді, алайда шындығында ол, құрал беті бөліктерге бөлінген полигондардан тұрады (CAD – қосымшасына тәуелді). Осылайша, айтылған бөліктерге бөлу сапасына негізделі отырып, MSC.Super Forge препроцессоры полигондар шыңдарынан ШЭӨ торсыздық түйіндерін құрай отырып, дайындаманың шеткі-элементтік торсызығын жасайтын болады. Оған қоса, дәрекі бөлшектеу көп жағдайда фигураны жасанды кішірейте отырып, алынатын фигураның көлеміне әсер етеді. Бұл есептеу дәлдігін төмендетудің тағы бір себебі болып табылады.

MSC.Super Forge бағдарламасын пайдаланушы нұсқаулығында, ойық бет үшін көпбұрыш қырларының өлшемі немесе екі көршілес қыр арасындағы бұрыш өлшемі қандай болу керектігі айтылмаған. Алайда, барлық жобалау нұсқаулықтарында ортақ идея көрсетілген – қойылған есептің қанағаттанарлық нәтижелеріне, шешімнің ұқсастығына қол жеткізу үшін, жанасу дағы кемінде шеткі элементтік тордың үш түйінінен тұруы қажет, ал құралда жұмырлану радиусы болған жағдайда – осы радиустың ұзындығы бойымен бір мезгілде кемінде үш тор түйіндері орналасуы қажет. Сөйтіп, жобалаған кезде барлық күшті осы шарттардың қамтамыз етуге жұмсау қажет.

MSC.Super Forge бағдарламалық кешенінде модельдеген жағдайда «дайындама мен құрал жанасуы» түсінігін нақтылау керек. Себебі, бұндай жағдайда препроцессор мен шешуші құрылғыда жанасу туралы өзгеше түсінік бар. Құралда орналасқан тор түйіндері кез келген жағдайда жанасу нүктелері болып табылады. Алайда препроцессор, құралдың бетінен белгілі бір мөлшерге алысырақ орналасқан жанасу нүктелерін қосуға жол беріп, торсыздықты дайындайды. Мұндай тәсілдеме есептеу нәтижелерінің жақсы сәйкес келуін қамтамасыз ете отырып, түйісу дағын жасанды ұлғайтуға мүмкіндік береді. Оған қоса, бұл әдіс қалың емес торсыздықтың пайдаланылуымен сенімді нәтижелерге қол жеткізуге мүмкіндік бере отырып, шешу уақытын қысқарта алады.

Жоғарыда көрсетілген шектеулер құралдар мен дайындаманың дұрыс геометриясын құруға, сонымен қатар MSC.Super Forge препроцессорында оларды элементтерге бөлінуге қатысты болады, алайда олардың өзара әрекеттесуіне қатысты емес.

Көптеген илемдеу процесі үшін дайындама мен құралдың өзара әректесу уақыты, орнак пішінбіліктерінің айналу жылдамдығымен шектелген. Екінші жағынан жаймаларды илемдеу процесінің, дайындама мен пішінбіліктердің орын ауыстыру жылдамдығы бойынша салыстыруға болады. Бірақта, деформациялау уақытын өзгерткен кезде алынатын жаймада пайда болатын КДҚ-де айырмашылықтар болмайды. Тек алынатын жайманың ұзындығы ғана өзгереді.

Бағдарламаның шешуші құралының жұмысына, модельдеу кезінде нысандар әрекеттесуінің дұрыс күйге келтірілуі үлкен әсер етеді. Ең қарапайым жағдай болып бас құралдың таңдалуы саналады. Біз зерттейтін процесіте жоғарыда айтылған қатысты қиындықтар туындамайды. Себебі орнак тұғырына бекітілген жоғарғы құрал талап етілетін қысу күшімен дайындаманы қысады, ал орнак жетегі оған қозғалыс береді. Пішінбілік мойнының тіректері қатты бекітілген. Алайда жоғарғы құралдың орын ауыстыруын модельдеген кезде мынандай қиындықтар туындайды:

- MSC.Super Forge бағдарламасында құралдың орын ауыстыруын белгілі бір жылдамдықпен беруге мүмкіндік бар. Бұл не тұрақты бұрыштық немесе орын ауыстырудың іглерлемелі жылдамдығы, не қиыстырылған болуы мүмкін. Сонымен қатар әртүрлі факторларға – пішінбіліктің, тұғырдың және орнақтың өзге ауыр жүктелген элементтерінің серпімді деформациясына тәуелді болатын орын ауыстыруды құруға болады. Алайда бір нысан үшін орын

ауыстырудың тек бір түрін пайдалану ұсынылады. Осылайша, бұрандалыпіншібіліктерде және бойлық-сыналы орнақта илемдеуді модельдеу кезінде тік осі бойынша серпімді деформацияны және осы оське қатысты екі піншібіліктің айналмалы қозғалысын ескеру қажет. Мұндай тәсілдеме оңтайлы болып келеді;

- зерттелетін илемдеу процесінде, орнақтың илемдеу осі бойымен, бір құралдың екіншіге қатысты орын ауыстыруы нақты анықталмайды. Дайындаманы құралға қысу күші анықталады. Бұндай жағдайда құралға күш шамасы мен оның бағытын берген кезде, шешуші құрылғы әрбір итерацияда берілген күшке сәйкес келетін құралдың орын ауыстыру мөлшерін есептейді. Осылайша, бұрандалы піншібіліктерде илемдеуді модельдеу кезінде илемдеу күші беріледі және піншібіліктердің орын ауыстыру немесе қозғалыс жылдамдығы анықталады;

- дайындама мен құралдың қысылысатындығынан бас тарту мүмкін болмағандықтан, оны пайдалану бойынша ұсыныстар қосылады. Жаншу мөлшерін белгілеу барысында, уақыт өте дайындамаға түсетін күш жоғарылап, бірнеше қадам санынан кейін берілген деңгейге шықса жағдай оңтайлы болып саналады. Осылайша, дайындама мен құрал әрекеттесуінің күрт басталуынан КДК-нің бұрмаланған облыстарының туындауын алдын алу болдырмауға болады.

Осылайша, дайындама мен құралдар пакетінің сауатты құрылған 3D-моделі, олардың өзара әрекеттесуінің дұрыс берілуі және модельдеу үшін қолданылатын бағдарламалық кешенмен дұрыс жұмыс істеудің белгілі бір ұсыныстарын білу, аяққы кезінде алынатын деректер сапасын жоғалтпай, машина уақытын ауқымды қысқартуға мүмкіндік береді. Дегенмен, шынайы өңдеу мен оның виртуалды моделімен салыстыруға мүмкіндік беретін кілтті фактор, материалдың механикалық қасиеттері жөніндегі мағлұматтар болып табылады.

Өңделетін материал жөнінде ақпарат жинау мәселесін талқылайық. ШЭӨ көмегімен КДК есептеу үшін қолданылатын дене, дайындама мен құрал модельдері дәлдігін үнемі жақсартуға болады. Зерттелетін материалдардың механикалық қасиеттері әртүрлі балқыманың өзінде әртүрлі болуы мүмкін. Сондықтан, қолданылатын материалға қатысты алынатын деректердің дәлдігін арттыру үшін, тәжірибені жүргізудің алдында физикалық және механикалық қасиеттерді дәлдеуді және модельдеуде дәлденген деректерді қолдануды талап етеді.

MSC.Super Forge бағдарламасында материал қасиеттерін математикалық бейнелеуге мүмкіндік бар [8]. Сонымен қатар, бағдарлама базасында өнеркәсіпте кеңінен қолданылатын металдар, қорытпалар мен композиттер жөнінде жеке мәліметтер бар. Алайда, модельдеуде дайындама материалы ағысының анықтамалық қисық сызығын пайдалану, есептеу мен тәжірибе деректерді салыстырған көптеген сұрақтарды тудыруы мүмкін.

Материал құрылымын әртекті орта ретінде қарастырған кезде, қойылған мақсатты бейнелеуге мен шешуге екі тәсілдемені қолдануға болады [2]. Бірінші тәсілдемеде, барлық дайындама көлемін, қасиеттерін біртекті тұтас орта ретінде бейнелейді. Құрылым әртектілігінің әсер етуімен дайындаманың механикалық қасиеттерінің өзгеруін ескеру үшін, КДК есептеген кезде, теңдеуге түзету коэффициенттерін енгізеді. Түзету коэффициенттерін теориялық немесе эмпирикалық жолмен анықтауға болады. Бұл тәсілдеме, есептің шешуін ықшамдауға мүмкіндік береді, алайда піншіөзгерту процесінде кернеу мен деформация таралуын жеткілікті дәлдікпен бағалауға мүмкіндік бермейді.

Көрсетілген кемшілікті екінші тәсілдемені қолдану арқылы шешуге болады. Бұл тәсілдеме бойынша дайындаманың көлемі дискретті орта ретінде қабылданады. Берілген тәсілдеме аясында дайындама композициялық материал ретінде қарастырылады.

Аққыштық шек пен ағыс кернеуінің деформациядан, деформация жылдамдығы мен температурадан тәуелділігін сипаттау үшін *анықтауыш теңдеулерді* немесе *анықтауыш модельдерді* пайдалануға болатындығы [3] жұмыстан бізге мәлім. Бұл қатынастардың пішіні, материалдың тәртібін тәжірибелік зерттеу барысында алынған заңдылықтарға негізделген. Материал тәртібінің микромеханикасымен келісілген анықтауыш модельдерді пайдаланған жөн. Бірақта бұл модельдер жеткілікті дәрежеде күрделі болып келеді. Осыған байланысты атым кең таралуды феноменологиялық тәуелділіктер алған.

Соңғы жылдары материалда өтетін микромеханикалық процеске негізделген, таза эмпирикалықтан (яғни аналитикалық қисықпен тәжірибелік деректерді сипаттау) физикалық модельдерге дейін көптеген модельдер саны ұсынылды [9]. Идеалды жағдайда бұл екі тәсілдеме



ортақ қатынаспен бір-бірін толықтыру қажет. Ортақ қатнас пластикалық ағысты бақылайтын, атомдық деңгейдегі физикалық процестер мен материалдың шынайы макроскопиялық тәртібін бірдей нақтылықпен сипаттайтын болуы қажет.

Әрине, практикада зерттеушінің негізгі мақсаты болып белгілі бір инженерлік тапсырманы шешу саналады [9]. Сондықтан, дислокациялық микромеханизмдеріне негізделген теориялық талдауға қарағанда, тәжірибелік деректермен және оларды нақты мәселеге қолдану мүмкіндігімен жұмыс істеу ұтымды деп саналады. Сондықтан эмпирикалық анықтауыш қатынастар үлкен танымалдылыққа иемденген. Дегенмен, физикалық тәсілдеме маңызды болып қалуда, себебі ол берілген эмпирикалық қатынастың негізіне салынған кейбір болжамдарды негіздеуге және оның қолданылуының мүмкін болатын шектерін анықтауға мүмкіндік береді.

Жалпы жағдайда анықтауыш қатынастарды тұрғызған кезде пайдаланатын эмпирикалық тәсілдемемен аналитикалық функцияны анықтайды [10]. Бұл функция кернеу мен жүктеу көрсеткіштері арасындағы тәжірибелік тәуелділікті баламалы бейнелейді. Егер деформация жылдамдығы мен температураның өзгеру тарихының нәтижесін ескермейтін болсақ, онда ағыс кернеуін  $\sigma_s$  (созу мен қысу үшін) деформация  $\epsilon$ , деформация жылдамдығы  $\dot{\xi}$  және температураның  $T$  кейбір функциясы түрінде жазуға болады:

$$\sigma_s = f(\epsilon, \dot{\xi}, T). \quad (20)$$

Тәжірибелік жолмен алынған мұндай бет, анықтауыш қатынасты жасау үшін негіз болып табылады.

Поликристалдық металдар үшін анықтауыш қатынастарды тұрғызудың екі тәсілдемесі көрсетілген [10]. Біріншісі аддитивті сипатқа иемденген (Людвик жұмысынан бастау алған):

$$\sigma_s = f_\mu(\sigma, T) + g_o(\dot{\xi}, T), \quad (21)$$

мұндағы  $f_\mu$  – деформациялық беріктендіру функциясы (жалпы жағдайда температураға тәуелді);

$g_o$  – релаксация функциясы, деформация жылдамдығының лездік мәні мен температуралық эффектін әсерін бейнелейді.

Тұтқырлы пластикалық ортадағы анықтауыш қатынастың дифференциалдық түрін Соколовский ұсынған және Мальвернмен модификацияланған [10]:

$$\dot{\xi} = \dot{\sigma} / E + g(\sigma, \epsilon), T = \text{const}, \quad (22)$$

мұндағы  $E$  – Юнг модулі.

Соколовский-Мальверн тәсілдемесіне негізделген инкрементті тұжырымдаманың жалпы түрін Кристеску және Люблинермен ұсынған [10]. Ол келесідей түрге иемденген:

$$\dot{\xi} = f_c(\sigma, \epsilon) \dot{\sigma} + g_c(\sigma, \epsilon), T = \text{const}, \quad (23)$$

мұндағы  $f_c$  лездік илемді жауап деп аталатын шама, ол сызықты емес болуы мүмкін.

Аналитикалық шешу және сандық есептеуде жиі қолданылатын екінші тәсілдеме, бұл аққыштық бетін мультипликациялық түрде көрсету болып табылады [10].

Ағыс кернеуін жалпы түрде келесідей жазуға болады [10]:

$$\sigma_s = f_1(\epsilon, T) f_2(\dot{\xi}, T) f_3(T). \quad (24)$$

Осыған ұқсас тұжырымдамалар [2] жұмыста келтірілген. Алайда мультипликациялық анықтауыш қатынастың ықшамдалған түрі жиі қолданылады:

$$\sigma_s = f_1(\sigma, \epsilon) f_2(\dot{\xi}) f_3(T). \quad (25)$$

Мұнда деформациялық беріктендірдің, деформация жылдамдығы мен температураның ағыс кернеуіне әсер ету эффекттері өзара тәуелсіз, демек, кернеу жүктеме түсіру жолынан тәуелді болмайды [10]. Илемді деформациялау физикасы тұрғысынан берілген тәсілдеме дұрыс емес болып табылатынын көрсетуге болады. Себебі, деформация мен жылдамдықтан беріктену температурадан тәуелді.

Соңғы жылдары компьютерлік бағдарламаларда жиі қолданылатын қарапайым анықтауыш қатынастарды дәлдеу жұмыстары жасалуда [10]. Көп жағдайда ол, деформация жылдамдығынан (логарифмдік немес дәрежелік түрі) тәуелді болатын кейбір мүшелерді, температураға тәуелді болатын кейбір мүшелерімен (қарапайым сызықтық функциялардан экспоненциалды мүшелері бар қатарға дейін) қиыстырудан тұрады.

Джонсон мен Кук [11] жұмыста, үлкен деформацияға, жоғары деформациялау жылдамдығы мен температураға ұшыраған металдар үшін таза эмпирикалық анықтауыш теңдеуді ұсынды. Джонсон-Кук моделі кеңінен таралып, өзінің қарапайымдылығы арқасында сандық талдаудың айтарлықтай барлық пакеттерінің материалдар кітапханасында енгізілді.

Джонсон-Кук моделінде Мизес ағысының кернеуі келесі түрде жазылады [11]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln \xi_p^*\right) (1 - T^{*m}), \quad T^* = \frac{T - T_o}{T_m - T_o}, \quad (26)$$

мұндағы  $\varepsilon_p$  – эквивалентті пластикалық деформациясы;  $\xi_p^* = \xi_s / \xi_o$  – пластикалық деформацияның өлшемсіз жылдамдығы;  $\xi_o = 1.0 \text{ с}^{-1}$ ;  $T_o$  және  $T_m$  – салыстырмалы температура және материалдың балку температурасы (сәйкесті жазылған). Бес материалдық константалар эмпирикалық жолмен анықталады:  $A, B, n, C$  и  $m$ .

(26) теңдеуіндегі бірінші жақшадағы өрнек материалдың деформациялық беріктенуін, екінші жақшадағы – деформация жылдамдығының лездік мәнінің ағыс шегіне әсерін анықтайды, ал үшінші мүше кернеудің температурадан тәуелділігін көрсетеді [12]. Бұл теңдеу температураның немесе деформация жылдамдығының өзгеру тарихының нәтижелерін ескермейді, алайда оны компьютерлік кодта оңай пайдалануға болады, ал модель көрсеткіштері тәжірибелердің шекті санымен жеңіл анықталады.

Джонсон-Кук моделі мультипликациялық типті бірқатар анықтауыш қатынастарының өкілі болып табылады [12]. Бұл модельдерде деформация мен жылдамдықтан беріктену және температурадан беріксіздену эффектілері өзара тәуелсіз болып саналады және ағыс кернеуін қарапайым масштабтау жолымен байқалады. Мұндай пішін қарапайым болып келеді және айқын физикалық түсіндіріледі. Алайда мұндай тәсілдеменің негізгі мәселесі болып беріктендіру жұмысын (немесе «кернеу-деформация» қиысығының көлбеулігін  $d\sigma/d\varepsilon$ ) сипаттау саналады.

Джонсон-Кук моделіндегі  $d\sigma/d\varepsilon$  шамасы, берілген деформацияда деформация жылдамдығы артқан сайын ұлғаятын болады [12]. Сондықтан Джонсон-Кук анықтауыш қатынасы, оттексіз мыс (OFCH - oxygen-free high-conductivity copper, МБ маркалы мыс) және никель [13,14] сияқты металдар үшін диаграмманың еңкеюіне деформация жылдамдығының әсерін баламалы сипаттайды, ал тантал сияқты материалдар тәртібін модельдеу үшін қолдануға ұсынылмайды. Өйткені мұнда «кернеу-деформация» диаграммасының еңкеюі деформациялау жылдамдығы артқан сайын, төмендейді. Модель көрсеткіштері, деформация жылдамдығы артқан кезде еңкеюдің үлкеюі аз болатындай етіп таңдалады. (26) теңдеуі, алюминий мен болат сияқты материалдардың тәртібін жақсы аппроксимациялауы мүмкін.

Екінші жағынан, Джонсон-Кук қатынасының мультипликациялық түрі материалдар тәртібінің температураға тәуелділігін дұрыс сипаттауға мүмкіндік береді [14].

Әртүрлі металдар мен қорытпалар үшін Джонсон-Кук моделі тұрақтыларының мәндерін [11-14] жұмыстарында табуға болады. Осы модельдің модификациялары [15-19] жұмыстарында келтірілген.

Зерилли мен Армстронг дислокация теориясына негізделген анықтауыш қатынастарды динамикалық есептеулерді жүргізгенде пайдалануға ұсынған [20]. Модельге, температуралық белсендіруді талдауға негізделген, деформация және жылдамдықпен беріктендіру және температуралық беріксіздену эффектілері кіргізілген. Қатынас, өзге дислокациялық анықтауыш модельдерімен салыстырғанда салыстырмалы қарапайым пішінге иемденген. Зерилли-Армстронг анықтауыш қатынасының дислокация теориясына негізделуі, басқа эмпирикалық анықтауыш теңдеулерімен салыстырғанда оның артықшылығын көрсетеді. Екінші жағынан, материалдың пластикалық тәртібінің осы моделдегі аса күрделі түрі, барлық қажетті тұрақты шамалардың мөлшерін анықтауды қиындатады. Осы модель авторлары ұсынған негізгі ереженің мәні болып, берілген микроқұрылымның дислокациялық сипаттамаларына байланысты, материал микроқұрылымының әрбір түрінде (БЦК – бетке центрленген куб торы, КЦК – көлемге центрленген куб торы) жеке анықтауыш теңдеудің бар болуы саналады.

Зерилли-Армстронг анықтауыш қатынасының екі түрі бар. БЦК- металдар үшін [20]:

$$\sigma = C_0 + C_2 \varepsilon_p^{1/2} \cdot \exp(-C_3 T + C_4 T \cdot \ln \xi^*), \quad (27)$$

Модельде материалдық төрт тұрақты шамалары кездеседі:  $C_0$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  және  $C_4$ . Мұнда бастапқы ағыс шегі  $C_0$ , деформация жылдамдығынан және температурадан тәуелді емес. Бұл мөлшер түйіршік өлшемімен былай анықталады [20]:

$$C_0 = \sigma_a + k_\varepsilon / d^{1/2}, \quad (28)$$

мұндағы  $\sigma_a$  – материалдың бастапқы микроқұрылымына жатқызылған, кернеудің атермиялық құрамдасы,  $d$  – түйіршіктердің орташа диаметрі және  $k_\varepsilon$  – материалдық константа.

КЦК-металдар өрнегі келесі түрге ие [20]:

$$\sigma = C_0 + C_2 \varepsilon_p^{1/2} \cdot \exp(-C_3 T + C_4 T \cdot \ln \xi^*) + C_5 \varepsilon_p^n, \quad (29)$$

Мұнда алты тұрақты материал кездеседі:  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_5$  және  $n$ . Бұл қатынасқа сәйкес, балқу температурасында кернеудің мәні нольге айналуы міндетті емес. Теңдеуде, КЦК-металдары үшін аса маңызды болып келетін қосымша физикалық құбылыс көрініс тапқан, яғни ығыстыру арқылы жүретін пластикалық ағысты егізделу есебінен жүретін пластикалық ағысқа ауыстыру.

КЦК-металдарына тән, жоғарғы және төменгі ағыс шегінің бар болу фактісі, (29) теңдеумен сипатталмайды [10]. Демек, аз деформациялауда модель кейбір орташа кернеуді сипаттайды. (29) теңдеуінен  $d\sigma/d\varepsilon$  шамасы деформация жылдамдығынан және температурадан тәуелді еместігін оңай байқауға болады.

Зерилли-Армстронг моделі КЦК-металдары үшін аддитивті сипатқа ие [10]. Беріктендіру жұмысының тұрақтылығы, оның негізгі мәселесі болып табылады. Себебі, КЦК металдары үшін бұл шама деформация жылдамдығы мен температурадан кейбір аз дәрежемен тәуелді болады.

Өртүрлі металдар үшін Зерилли-Армстронг модельдері тұрақтысының мәндерін [21-23] жұмыстарынан табуға болады. БЦК-металдар үшін Зерилли-Армстронг анықтауыш қатынасының кішігірім модификациясы [23] жұмыста ұсынылған. Мұнда эквиваленттік деформация дәрежесінің көрсеткіші ретінде тағы бір  $n$  материал тұрақтысы ( $1/2$  орнына) енгізілген.

*Қорытынды.* MSC.Super Forge кешенді бағдарламасында қолданылатын шеткі-элементтік әдістемені пайдаланып, бойлық-сыналы орнақта және бұрандалы пішінділікте дайындаманы илемдеудің компьютерлік моделі жасалды. Мақсатты және шекаралық шарттарды тартымды белгілейтін компьютерлік модельде жеке шеткі элементке материал қасиетін берудің мүмкіндігі бар болғандықтан, біркелкі емес материал құрылымын ескеріп және есептеу уақытын қысқартып кернеулі-деформация күйі есептеуге мүмкіндік бар екені мақалада дәлелденді.

Мақала қаржыланатын №757 МОН.ГФ.15.ЭМ4: «Жоғары сапалы жұқа жолақтарды илемдеуге арналған көпқызметті үздіксіз бойлық-сыналы орнақтың жана конструкциясын жасау» тақырыбы бойынша жазылған.

## ӘДЕБИЕТ

- [1] Иванов К.М., Шевченко В.С., Юргенсон Э.Е. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД: Учебное пособие. С-Пб.: Институт Машиностроения, 2000. – 217 с.
- [2] Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. - М.: Металлургия, 1983. - 352 с.
- [3] Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
- [4] Филимонов В.И., Мищенко О. В. Теория обработки металлов давлением. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 208 с.
- [5] Тюрин В.А., Мохов А.И. Теория обработки металлов давлением. / Под ред. проф. В.А. Тюрина. Учебник для вузов. – Волгоград: РПК «Политехник», 2000. – 416 с.
- [6] Патент РК № 30450. Способ получения сверхпластичного листа из алюминниевое сплава / Машеков А.С. Турдалиев А.Т., Смагулова Н.К. и др. // 15.10.2015. Бюл.№10. 3 с.: ил.
- [7] Патент РК № 31750. Многофункциональный продольно-клиновыи стан для прокатки листов из сталей и сплавов /С.А. Машеков, Б.Н. Абсадыков, Е.З. Нугман и др. // Опубл. 30.12. 2016 г в БИ № 18.
- [8] Программа MSC.SuperForge как один из элементов системы виртуального производства и управления качеством изделий // Солдаткин А., Голенков Ю. и др. САПР и графика, 2000, №7. - С. 11-13.
- [9] Попов Н.Н. Получение полных диаграмм растяжения сплавов АМг6 и МА18 при скоростях деформации  $10^3 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$  // Проблема прочности, 1981, №12. - С. 50 - 59.

- [10] Лапшин Д.А. Расчетно-экспериментальный анализ прочности внутриобъектовых транспортных контейнеров реакторов типа БН в авариях с падением // Дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. Нижний Новгород: Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова», 2015. – 222 с.
- [11] Johnson, G.R., Cook, W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistic, The Hague, The Netherlands, 1983, pp. 541-547.
- [12] Johnson G.R., Coldy D.D., Vavrick D.J. Three-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads // Int. J. for Numerical Methods in Engineering. - 1979. - V. 14. - P. 1865-1871.
- [13] Follansbee P.S., Huang J.C., Gray G.T. Low-temperature and high-strain-rate deformation of nickel and nickel-carbon alloys and analysis of the constitutive behavior according to an internal state variable model // Acta Metallurgical and Materials, 1990, 38 (7), 1241-1254
- [14] High-strain-rate deformation of FCC metals and alloys / P.S. Follansbee, L.E. Murr, K.P. Staudhammer, M.A. Meyers // Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena. New York, 1986, pp. 451-478.
- [15] Akhtar S. Khan, Riqiang Liang. Behaviors of three BCC metal over a wide range of strain rates and temperatures: experiments and modeling // International Journal of Plasticity, 15, 1999, pp. 1089-1109.
- [16] Constitutive behavior of tungsten and tantalum experiments and modeling / S.R. Chen, G.T. Gray, A. Bose, R.J. Dowling // 2nd International Conference on Tungsten and Refractory Metals. McLean, VA, 17-19 October. Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1995, pp. 489-498.
- [17] Couque H., Boulanger R. and Bornet F. A modified Johnson-Cook model for strain rates ranging from 10<sup>-3</sup> to 10<sup>5</sup> s<sup>-1</sup> // J. Phys IV, Vol. 134 (2006), pp. 87-93.
- [18] Follansbee P. S. and Kocks U. F. A constitutive description of the deformation of copper based on the use of mechanical threshold stress as an internal state variable. Acta Metall. 1988.36(1), pp.81-93.
- [19] 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, pp. 186–190.
- [20] Zerilli, F.J., Armstrong, R.W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations. Journal of Applied Physics, 1987, 61 (5), pp.1816-1825.
- [21] Evaluation and improvement in constitutive equations for finite viscoplastic deformation and fracturing behavior relating to armor design / Armstrong, R.W., Chen, C.C., Dick, R.D., Zhang, X.J. // Internal Report, The University of Maryland, 1997. 27, pp.1671-1678.
- [22] Hoge, K.G., Mukherjee, A.K. The temperature and strain rate dependence of the flow stress of tantalum // Journal of Materials Science 1977, 12, pp. 1666-1672.
- [23] Zerilli, F.J., Armstrong, R.W. Description of tantalum deformation behavior by dislocation mechanics based constitutive relations. Journal of Applied Physics, 1990, 68 (4), pp.1580-1591.

## REFERENCES

- [1] Ivanov K.M., Shevchenko V.S., Jurgenson Je.E. Metod konechnykh jelementov v tehnologicheskikh zadachah OMD: Uchebnoe posobie. S-Pb.: Institut Mashinostroenija, 2000. – 217 s.
- [2] Gun G.Ja. Matematicheskoe modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem. - M.: Metallurgija, 1983. - 352 s.
- [3] Kolmogorov V.L. Mehanika obrabotki metallov davleniem. – M.: Metallurgija, 1986. – 688 s.
- [4] Filimonov V.I., Mishhenko O. V. Teorija obrabotki metallov davleniem. – Ul'janovsk: UIGTU, 2012. – 208 s.
- [5] Tjurin V.A., Mohov A.I. Teorija obrabotki metallov davleniem. / Pod red. prof. V.A. Tjurina. Uchebnik dlja vuzov. – Volgograd: RPK «Politehnik», 2000. – 416 s.
- [6] Patent RK № 30450. Sposob poluchenija sverhplastichnogo lista iz aljuminievogo splava / Mashekov A.S. Turdaliev A.T., Smagulova N.K. i dr. // 15.10.2015. Bjul. №10. 3 s.: il.
- [7] Patent RK № 31750. Mnogofunkcional'nyj prodol'no-klinovyj stan dlja prokatki listov iz stalej i splavov / S.A. Mashekov, B.N. Absadykov, E.Z. Nugman i dr. // Opubl. 30.12. 2016 g v BI № 18.
- [8] Programma MSC.SuperForge kak odin iz jelementov sistemy virtual'nogo proizvodstva i upravlenija kachestvom izdelij // Soldatkin A., Golenkov Ju. i dr. SAPR i grafika, 2000, №7. - S. 11-13.
- [9] Popov N.N. Poluchenie polnykh diagramm rastjazhenija splavov AMg6 i MA18 pri skorostjah deformacii 10<sup>-3</sup>...10<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> // Problema prochnosti, 1981, №12. - S. 50 - 59.
- [10] Lapshin D.A. Raschetno-jeksperimental'nyj analiz prochnosti vntriobjektovykh transportnykh kontejnerov reaktorov tipa BN v avarijah s padenijem // Diss. na soiskanie uch. stepenikand. tehn. nauk. Nizhnij Novgorod: Akcionernoe obshhestvo «Opytnoe konstruktorskoe bjuro mashinostroenija im. I.I. Afrikantova», 2015. – 222 s.
- [11] Johnson, G.R., Cook, W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistic, The Hague, The Netherlands, 1983, pp. 541-547.
- [12] Johnson G.R., Coldy D.D., Vavrick D.J. Three-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads // Int. J. for Numerical Methods in Engineering. - 1979. - V. 14. - P. 1865-1871.
- [13] Follansbee P.S., Huang J.C., Gray G.T. Low-temperature and high-strain-rate deformation of nickel and nickel-carbon alloys and analysis of the constitutive behavior according to an internal state variable model // Acta Metallurgical and Materials, 1990, 38 (7), 1241-1254
- [14] High-strain-rate deformation of FCC metals and alloys / P.S. Follansbee, L.E. Murr, K.P. Staudhammer, M.A. Meyers // Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena. New York, 1986, pp. 451-478.
- [15] Akhtar S. Khan, Riqiang Liang. Behaviors of three BCC metal over a wide range of strain rates and temperatures: experiments and modeling // International Journal of Plasticity, 15, 1999, pp. 1089-1109.

- [16] Constitutive behavior of tungsten and tantalum experiments and modeling / S.R. Chen, G.T. Gray, A. Bose, R.J. Dowding // 2nd International Conference on Tungsten and Refractory Metals. McLean, VA, 17-19 October. Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1995, pp. 489-498.
- [17] Couque H., Boulanger R. and Bornet F.A modified Johnson-Cook model for strain rates ranging from 10<sup>-3</sup> to 10<sup>5</sup> s<sup>-1</sup> // J.Phys IV, Vol. 134 (2006), pp. 87-93.
- [18] Follansbee P. S. and Kocks U. F.A constitutive description of the deformation of copper based on the use of mechanical threshold stress as an internal state variable. Acta Metall. 1988.36(1), pp.81-93.
- [19] 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, pp. 186-190.
- [20] Zerilli, F.J., Armstrong, R.W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations. Journal of Applied Physics, 1987, 61 (5), pp.1816-1825.
- [21] Evaluation and improvement in constitutive equations for finite viscoplastic deformation and fracturing behavior relating to armor design / Armstrong, R.W., Chen, C.C., Dick, R.D., Zhang, X.J. // Internal Report, The University of Maryland, 1997. 27, pp.1671-1678.
- [22] Hoge, K.G., Mukherjee, A.K. The temperature and strain rate dependence of the flow stress of tantalum // Journal of Materials Science 1977, 12, pp. 1666-1672.
- [23] Zerilli, F.J., Armstrong, R.W. Description of tantalum deformation behavior by dislocation mechanics based constitutive relations. Journal of Applied Physics, 1990, 68 (4), pp.1580-1591.

С.А. Машеков<sup>1</sup>, Б.Н. Абсадыков<sup>2</sup>,  
М.М. Акимбекова<sup>1</sup>, Э.А. Тусупкалиева<sup>1</sup>, М.Р. Мауленова<sup>1</sup>

### КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА В ВОЛНИСТЫХ ВАЛКАХ И ПРОДОЛЬНО-КЛИНОВОМ СТАНЕ

**Аннотация.** В статье описано современное состояние и методологические особенности численного моделирования процессов обработки металлов давлением, выделены основные проблемные моменты традиционных методов. Проанализированы проблемные вопросы математического моделирования и, тем самым, исследования напряженно-деформированного состояния процессов обработки металлов давлением. В статье приводится определяющая система уравнений для описания процессов деформирования заготовки в винто-образных валках и продольно-клиновом стане, конечно-элементная методика ее решения. Описаны основные этапы создания конечно-элементной модели в программном комплексе MSC.Super Forge, а также метод, позволяющий прогнозировать распределение деформации в объеме деформируемого металла с учетом особенностей микроструктуры.

**Ключевые слова:** обработки металлов давлением, прокатка, винтообразные валки, продольно-клиновый стан, метод конечных элементов, интенсивность деформации, интенсивность напряжении, температура.

#### Сведения об авторах:

*Машеков Серик Акимович\** – доктор технических наук, профессор.

Почтовый адрес: 050013. г. Алматы, ул. Сатпаева 22. Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева, кафедра «Станкостроение, материаловедение и технология машиностроительного производства» (СМиТМП).

Рабочий телефон: (8-727) 292 – 11 – 56, Домашний адрес: 040925. г. Алматы, микрорайон Теректи, ул. Абая 3.  
Домашний телефон: (8-727) 388 – 41 – 07, Мобильный телефон: 8-702-100-17-00, [mashekov.1957@mail.ru](mailto:mashekov.1957@mail.ru)

*Абсадыков Бахыт Нарикбаевич* - доктор технических наук, профессор.

Почтовый адрес: 050013. г. Алматы, ул. Сатпаева 22. Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева, кафедра СМиТМП.

Рабочий телефон: (8-727) 257 – 71 – 68, Домашний адрес: 050028. г. Алматы. микрорайон Кокжиек 18, кв.32.  
Мобильный телефон: 8-777-225-56-84, Электр.почта: [b\\_absadykov@mail.ru](mailto:b_absadykov@mail.ru)

*Тусупкалиева Эльмира Адиетовна* – докторант, 1978 года рождения.

Почтовый адрес: 050013. г. Алматы, ул. Сатпаева 22. Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева, кафедра СМиТМП.

Рабочий телефон: (8-727) 257 – 71 – 68, Мобильный телефон: 8-707-978-03-21.

Домашний адрес: г. Алматы, ул. Пятницкого 6/2, кв. 24, Электр.почта: [elatus78@mail.ru](mailto:elatus78@mail.ru).

*Акимбекова Маржан Мырзакановна* – докторант кафедры «Станкостроение, материаловедение и технология машиностроительного производства.

Почтовый адрес: 050013. г. Алматы, ул. Сатпаева 22. Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева, кафедра СМиТМП. Рабочий телефон: (8-727) 257 – 71 – 68, Электронная почта: [akimbekova\\_2011@mail.ru](mailto:akimbekova_2011@mail.ru)

*Мауленова Мария Р* – докторант кафедры «Станкостроение, материаловедение и технология машиностроительного производства.

Почтовый адрес: 050013. г. Алматы, ул. Сатпаева 22. Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева, кафедра СМиТМП. Рабочий телефон: (8-727) 257 – 71 – 68, Электронная почта: [maulenoa\\_m@mail.ru](mailto:maulenoa_m@mail.ru)