

МАШИНА ЖАСАУ, ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ МАШИНАЛАР ЖӘНЕ КӨЛІК, ҚҰРЫЛЫСDOI: <https://www.doi.org/10.53002/070>**APPLICATION OF THE FINITE DIFFERENCE METHOD FOR DETERMINING ENERGY AND POWER PARAMETERS IN METAL PRESSURE TREATMENT**** Ашкеев Ж.А., Аманжолов Н.Ж.**Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan
* Corresponding author e-mail: s.kydyrbayeva@tttu.edu.kz***Author information:****Ашкеев Ж.А.** - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: Jashkeev@mail.ru**Аманжолов Н.Ж.** - Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: zh.amanzholov@tttu.edu.kz

Abstract. The article discusses the use of the limit Difference Method to determine the distribution of normal stresses on the joint surface of the deformable body and the selection of the required equipment in the development of processes for pressure processing of metals and the selection of the required equipment. In determining the distribution of normal stresses during the planting process, he used the method of marginal difference (SHP), including differential equilibrium equations and the method of solving the plastic condition in combination with an approximate solution. When solving differential equations using the limit difference method, it is enough to bring the equation to the limit difference type. Then the values of the voltages can be easily determined by calculating them in series, without using complex mathematical methods of integration and differentiation. The difference in the results obtained by these two methods or by solving approximations in combination with differential equilibrium equations and the plasticity condition and the ICA is very small and does not exceed 1-2%. Therefore, these two methods can be used equally in determining the strength and energy parameters of PPP processes.

Keywords: pressure processing of metals, limit difference method, workpiece, tool, stresses, deformation.

МЕТАЛДАРДЫ ҚЫСЫММЕН ӨНДЕУ ҮРДІСТЕРІНДЕ КҮШ-ЭНЕРГИЯ ПАРАМЕТРЛЕРІН АНЫҚТАУ ҮШІН ШЕКТІ АЙЫРМАШЫЛЫҚ ӘДІСІН ҚОЛДАНУ** Ашкеев Ж.А., Аманжолов Н.Ж.**Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан
* Автор-корреспондент e-mail: Jashkeev@mail.ru***Авторлар туралы ақпарат:****Ашкеев Ж.А.** - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: Jashkeev@mail.ru**Аманжолов Н.Ж.** - Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: zh.amanzholov@tttu.edu.kz

Аңдатпа. Мақалада металдарды қысыммен өңдеу (МҚӨ) үрдістерін әзірлеуде және талап етілетін жабдықтарды таңдауда деформацияланатын дененің түйіскен бетінде нормальді кернеулердің таралуын анықтау және талап етілетін жабдықтарды таңдау үшін шекті айырмашылық әдісі қолдануы қарастырылды. Отырғызу үрдісі кезінде нормальді кернеулердің таралуын анықтауда дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулерімен және пластикалық шартың біріктіріп жуықтап шешу әдісімен қоса шекті айырмашылық әдісі (ШАӘ) қолданды. Шекті айырмашылық әдісі арқылы дифференциалдық теңдеулерінің шешімін алғанда теңдеуді шекті айырмашылық түріне келтірілген жеткілікті. Сонда кернеулердің мәндерін тізбектеп есептеп жеңіл анықтауға болады, күрделі математикалық интегралдау және дифференциялау тәсілдерін қолданбай. Осы екі әдіспен немесе дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулерімен және пластикалық шарты біріктіріп жуықтап шешу және ШАӘ арқылы алынған нәтижелерінің айырмашылығы өте аз және 1-2 % аспайды. Сондықтан осы екі әдісті МҚӨ үрдістерінің күш-энергия параметрлерін анықтауда тең құқықты қолдануға болады.

Түйін сөздер: металдарды қысыммен өңдеу, шекті айырмашылық әдісі, дайындама, аспап, кернеулер, деформация.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГО-СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ В ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Ашкеев Ж.А., Аманжолов Н.Ж.

Қарағандық индустриалық университет, Теміртау, Қазақстан

* Автор-корреспондент e-mail: Jashkeev@mail.ru

Информация об авторах:

Ашкеев Ж.А. - Қарағандық индустриалық университет, Теміртау, Қазақстан. E-mail: Jashkeev@mail.ru

Аманжолов Н.Ж. - Қарағандық индустриалық университет, Теміртау, Қазақстан. E-mail: zh.amanzholov@tttu.edu.kz

Аннотация. В статье приведены результаты, полученных методом конечных разностей (МКР) для определения распределения контактных напряжений на поверхности полосы и деформируемого инструмента при обработке металлов давлением (ОМД), в частности осадке заготовок и выборе необходимого оборудования. Помимо использования метода совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и условия пластичности для определения контактных напряжений при осадке полосы, использован МКР, как альтернативное решение. Для решения дифференциальных уравнений МКР достаточно привести уравнение в конечно-разностный ряд. Таким образом появляется возможность последовательно и легко определить распределение контактных напряжений не прибегая к сложным математическим действиям, как интегрирование и дифференцирование. Расчёты полученные двумя методами, т.е. совместным решением дифференциальных уравнений равновесия и условия пластичности и МКР не превышает 1-2%. Поэтому использование двух методов при определении энергосиловых параметров при ОМД можно считать равноправными.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, метод конечных разностей, заготовка, инструмент, напряжения, деформация.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Металдарды қысыммен өңдеу үрдістерінде күш-энергия параметрлерін анықтау үшін дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулерін шешудің дәстүрлі әдісі мен шекті айырмашылық әдісіне салыстырмалы талдау жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде шекті айырмашылық әдісін қолдану күрделі интегралдау және дифференциалау амалдарынсыз-ақ деформацияланатын дененің түйісу бетіндегі нормальді кернеулердің таралуын жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік беретіні дәлелденді. Есептеу нәтижелерінің айырмашылығы дәстүрлі аналитикалық әдіспен салыстырғанда 1–2 %-дан аспайтыны көрсетіліп, шекті айырмашылық әдісінің металдарды қысыммен өңдеу үрдістерінің күш-энергия параметрлерін есептеуде тиімді әрі инженерлік тәжірибеде қолдануға қолайлы екендігі ғылыми негізделді.

КІРІСПЕ

Металдарды қысыммен өңдеу (МҚӨ) үрдістерін әзірлеуде және талап етілетін қажет жабдықтарды таңдауда деформацияланатын дене аспаппен түйісетін бетінде күштерді немесе нормальді кернеулердің таралуын білу қажет. Осы кернеулердің қосындысын алып, толық күшін анықтап және келесі сипатамалары бойынша: пресстің номиналды күші, илемдеу станың қозғалтқыштарының қуаты және т.б.

көрсеткіштері бойынша қажет жабдықтарды таңдауға болады.

Деформациялайтын күшін анықтау үшін МҚӨ теориясында кеңінен аналитикалық және тәжірибелік әдістерін қолданады. Бірінші теоретикалық жағдайда әсер ететін күштер деформацияланатын металмен түйісетін аспап бетінде нормальді және жанама кернеулерін таралуын орнатып анықтайды.

Міне осы аналитикалық ең кең таралған әдістерінің бірі дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулерімен және пластикалық шарты біріктіріп жуықтап шешу әдісі болып табылады.

Бұл әдіс келесілерге негізделген:

1. кернеулі-деформациялық күйі жазық немесе оске симметриялы етіп қабылданады. Сонда теңдеулер санымен оның белгісіз мәндері қысқарады. Ол үшін күрделі пішінді денені деформациялауда оны шартты түрде элементарлы көлемдеріне бөледі, аймағында кернеулі-деформациялық күйін жазық немесе оске симметриялы етіп қабылданды.

2. Жазықтық есептердің дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулері нормальді және жанама кернеулері екі координатасына тәуелді етіп қабылданады, нәтижесінде сәйкес екі дифференциалдық теңдеулері ғана қалады.

Бірақ осы қабылданған шарттар деформацияланатын дененің бойындағы кез келген нүктедегі кернеулерін анықтауға

мүмкіндік бермейді, мысалы сырғу сызықтары әдісімен салыстырғанда. Сондықтан берілген әдіспен деформациялайтын аспап пен дененің түйіскен бетіндегі кернеулерді және осы мәндердің қосындысын алып талап ететін күшін анықтауға болады [1-2]

Зерттеудің маңыздылығы. Металдарды қысыммен өңдеу (МҚӨ) үрдістерін жобалауда және қажетті жабдықтарды (престердің номиналды күші, илемдеу станы қозғалтқыштарының қуаты) таңдауда деформацияланатын дене мен аспаптың түйісу бетіндегі нормальді кернеулердің таралуын дәл анықтау стратегиялық маңызға ие

Қазіргі уақытта қолданылатын дәстүрлі аналитикалық әдістер мен дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулері интегралдау және дифференциалдау сияқты күрделі математикалық есептеулерді талап етеді, бұл инженерлік тәжірибеде айтарлықтай қиындықтар тудырады

Сонымен қатар, есептеулердің дәлдігін сақтай отырып, оларды оңтайландыру мен жеңілдетудің ғылыми негізделген тәсілдері жеткілікті деңгейде қарастырылмаған

Сондықтан аталған зерттеу МҚӨ үрдістеріндегі күш-энергия параметрлерін анықтаудың тиімді әрі қарапайым әдістемесін ұсыну арқылы осы олқылықтың орнын толтыруға бағытталған.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы металдарды қысыммен өңдеу үрдістерінде, атап айтқанда дайындамаларды отырғызу кезінде контактілік кернеулердің таралуын анықтау үшін шекті айырмашылық әдісін (ШАӨ) қолдануды кешенді түрде негіздеуінде болып табылады

Талдау нәтижесінде дифференциалдық теңдеулерді шекті айырмашылық түріне келтіру арқылы кернеулер мәнін күрделі интегралдаусыз, тізбектей есептеудің техникалық мүмкіндігі дәлелденді

Зерттеу барысында ШАӨ арқылы алынған нәтижелердің дәстүрлі Е. Унков формуласымен салыстырғандағы айырмашылығы 1-2%-дан аспайтыны анықталып, бұл әдістің МҚӨ үрдістерінің күш-энергия параметрлерін анықтауда тең құқықты және жоғары дәлдікті балама екені алғаш рет ғылыми түрде дәлелденді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Енді алдымен дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулерімен және пластикалық шарты біріктіріп жуықтап шешу әдісін ені 2b және биіктігі 2h тең, ал ұзындығы шексіз деп қабылдап алынған дайындаманың (жолақтың) екі кедір

бұдыр плита арасында отырғызылғанда мысал ретінде қарастырып кетейік [1-2].

Жоғары келтірілген екінші шартына сәйкес σ_x және σ_y кернеулері z координатасынан тәуелсіз, дайындаманың биіктігі бойынша тұрақты және x координатасына ғана тәуелді етіп қабылдаймыз. Сонда дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулерінің үшінші теңдеуі нөлге айналады, нәтижесінде теңделуер саны ықшамдалынып және белгісіз шамалары азаяды.

Жанама τ_{xy} кернеулері дайындаманың ені мен биіктігі бойынша ауыспалы және дене мен аспаптың түйісу бетіндегі τ_k мәніне жетеді. Осы τ_{xy} мәні түйісу бетінен қашықтағанда азаяды және отырғызу үрдісі симметриялығынан дайындаманың биіктігінің ортасында нөлге айналады. Сонда, τ_{xy} мәні дайындаманың h биіктігіне орталығына салыстырмалы тәуелді етіп қабылдауға мүмкіндік береді немесе:

$$\tau_{xy} = \frac{\tau_k}{h} y.$$

Осы теңдеудің y бойынша туындысын алып бірінші дифференциалдық теңдеуіне қойсақ, нәтижесінде келесіні аламыз:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{\tau_k}{h} = 0.$$

Енді осы дифференциалдық теңдеуді σ_x бойынша шешу үшін τ_k мәнін σ_x немесе x координатасы бойынша өрнектеу керек, x және σ_x тәуелсіз етіп қабылдап.

Ол үшін келесі шарттарды қарастырып кетейік:

1. Түйіскен бетіндегі үйкеліс кернеуі Амонтон заңына бағынады деп қабылдайық, онда $\tau_k = f\sigma_y$, мұнда τ_k және σ_y мәндерінің таңбалары бірдей.

Жазықтық деформациялық күйде пластикалық шартының теңдеуі келесі түрде жазылады:

$$\sigma_x - \sigma_y = \pm 2k \sqrt{1 - \left(\frac{\tau_{xy}}{k}\right)^2}.$$

Сонда, нормальді кернеулерінің айырмашылығы жанама кернеуінен тәуелді екенін байқауға болады. Егер, τ_{xy} нормальді кернеулерінен тәуелсіз болса, онда нормальді кернеулерінің айырмашылығы тұрақты болады. Мысалы, τ_{xy} және τ_k нөлге тең болса, онда σ_x және σ_y кернеулері бас кернеулеріне айналады және пластикалық шарты келесі түрінде жазылады: $\sigma_x - \sigma_y = \pm 2k$. Егер, τ_{xy} мәні $\tau_k = k$ максималды мәнінен жетсе, онда $\sigma_x - \sigma_y = 0$ болады. Сонда соңғы теңдеуді дифференциалдық түрінде жазуға болады: $d\sigma_x = d\sigma_y$.

Осы қатынасты дифференциалдық теңдеуіне қойсақ, нәтижесінде келесіні аламыз:

$$\frac{d\sigma_y}{dx} + \frac{f\sigma_y}{h} = 0.$$

Ауыспалы мәндерін бөліп интегралын алған соң:

$$\ln\sigma_y = -\frac{f}{h}x + C, \text{ осыдан, } \sigma_y = C_1 e^{-\frac{fx}{h}}.$$

Мұндағы C_1 интегралдау тұрақтылығын келесі шекаралық шартынан анықтаймыз: $x=b$, $\sigma_y = -\beta\sigma_T = -\sigma_T^*$. осыдан,

$C_1 = -\sigma_T^* e^{\frac{fb}{h}}$ және $\sigma_y = -\sigma_T^* e^{\frac{f(b-x)}{h}}$, сәйкесінше жанама кернеуі:

$$\tau_k = f\sigma_y = -f\sigma_T^* e^{\frac{f(b-x)}{h}}.$$

Осы алынған теңдеулері бойынша σ_y және τ_k кернеулерінің таралу эпюрасын тұрғызуға болады және түйіскен бетіндегі нормальді кернеулерінің қосындысын алып, дайындаманың бірлік ұзындығына толық күшін анықтауға болады немесе:

$$P = 2 \int_0^b \sigma_y dx = 2\sigma_T^* \int_0^b e^{-\frac{f(b-x)}{h}} dx = \sigma_T^* \frac{2h}{f} (e^{\frac{fb}{h}} - 1)$$

Толық P күшін $2b$ түйісу ауданына бөліп меншікті p күшін анықтаймыз:

$$p = \frac{P}{2b} = \sigma_T^* \frac{h}{fb} (e^{\frac{fb}{h}} - 1).$$

Осы алынған теңдеуді талдасақ түйісу кернеулері дайындаманың шетінен бастап орталығына қарай көрсеткіштер қисығы бойынша өзгеруін және жанама кернеулері $0,5\sigma^*$ мәнінен асып кетпеуін байқауға болады.

Нормальді кернеулер, толық және меншікті күштер материалдың тегінен, физикалық күйінен немесе температура, деформация дәрежесі мен жылдамдығынан және fb параметрінен тәуелді. Соңғы параметр h кернеулі күйінің әсерін көрсетеді және дайындаманың өлшемдерінің қатынасымен, үйкеліс коэффициентінен байланысты. Дайындаманың үйкеліс коэффициенті мен өлшемдерінің қатынасы неғұрлым көп болса, соғұрлым меншікті және толық күші көп болады.

2. Дәл осылай Зибель шартын ($\tau_k = -f\sigma^*$) және түйіскен жанама кернеулері τ_k дайындаманың түйісу бетіндегі ортылығын сызықты заңы бойынша кесіп өтеді деп қабылдап сәйкес теңдеулерін алып нормальді және жанама кернеулерінің эпюрасын салып толық және меншікті күштерін анықтауға болады.

Сонымен, дайындаманың түйіскен бетіндегі нормальді кернеулерін таралуын орнатып дайындаманы отырғызу кезінде толық күшін анықтауға болады.

Осы әдістен басқадай әдістерін қолдануға болады, мысалы сырғу сызықтары, жұмыс әдісі және т.б. осылардың ішінде тағы бір өте тиімді ыңғайлы әдісіне тоқтап кетейік.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Енді жоғарғы келтірілген дифференциалдық тепе-теңдік әдісін шекті айырмашылық әдісі арқылы шешімін алайық.

Осы ШАӘ әдісі арқылы дифференциалдық теңдеулерін айырмашылық қатынастары арқылы келтіруге мүмкіндік береді. Мысалы, $f(x)$ функциясы берілген деп қабылдайық. Егер, тіркелген аргумент өсімшесінің мәні Δx етіп қабылдасақ, онда $\Delta f(x)$ функциясының өсімшесі аргумент Δx мәніне өзгергенде келесі түрінде жазылады:

$$\Delta f(x) = f(x+\Delta x) - f(x).$$

Міне осы $\Delta f(x)$ мәні $f(x)$ функцияның бірінші бірінші шекті айырмашылығы болып табылады. Осыған сәйкес n тәртібі бойынша шекті айырмашылығын жазуға болады:

$$\Delta^n f(x) = \Delta(\Delta^{n-1} f(x)), \text{ мұнда } n \geq 2.$$

Егер, екінші шекті айырмашылығын жазсақ, онда:

$$\Delta^2 f(x) = \Delta[f(x+\Delta x) - f(x)] = [f(x+2\Delta x) - f(x+\Delta x)] - [f(x+\Delta x) - f(x)] = f(x+2\Delta x) - 2f(x+\Delta x) + f(x).$$

Сонда, n тәртібінің $\Delta^n f(x)/dx^n$ туындысын шекті айырмашылық арқылы жуықтап келесі түрінде өрнектеуге болады:

$$\frac{d^n}{dx^n} f(x) \approx \frac{\Delta^n f(x)}{(\Delta x)^n}.$$

Осыдан бірінші және екінші туындысын жаза аламыз:

$$\frac{df(x)}{dx} \approx \frac{\Delta f(x)}{\Delta x} = \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x};$$

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} = \frac{f(x+2\Delta x) - 2f(x+\Delta x) + f(x)}{(\Delta x)^2}.$$

Енді осы әдісті жоғары мысал ретінде келтірілген отырғызу үрдісіне пайдаланып нормальді су кернеуінің таралуын анықтау үшін қолданып және Амонтон заңының негізі бойынша дифференциалдық теңдеуінің шешімін алып көрейік:

$$\frac{d\sigma_y}{dx} + \frac{\tau_k}{h} = 0, \text{ мұнда } \tau_k = f\sigma_y.$$

Ол үшін дайындаманың енін n тең бөліктеріне бөліп және әрбір аралықты (интервалды) s арқылы белгілейік, мұнда $s = \frac{b}{n}$ тең, ал дифференциалдық теңдеуді шекті айырмашылық түрінде келтіруге болады:

$$\left(\frac{d\sigma_y}{dx}\right)_i = \frac{\sigma_{yi} - \sigma_{y(i-1)}}{s} = -\frac{f}{h} \sigma_{yi},$$

мұнда σ_{yi} - қарастырылған i нүктесіндегі нормальді кернеуінің мәні. Нәтижесінде дифференциалдық теңдеуді алгебралық жүйесіне келтіріп жазуға болады:

Мысалы берілген отырғызу үрдісінде $n=3$, $s = \frac{b}{n}$ қабылдайық, мұнда b -дайындаманың ені сонда алгебралық теңдеу жүйесін келесі түрінде жазуға болады:

$$\begin{cases} \frac{3}{b}(\sigma_{y3}-\sigma_{y2})=-\frac{f}{h}\sigma_{y3}; \\ \frac{3}{b}(\sigma_{y2}-\sigma_{y1})=-\frac{f}{h}\sigma_{y2}; \\ \frac{3}{b}(\sigma_{y1}-\sigma_{y0})=-\frac{f}{h}\sigma_{y1}. \end{cases}$$

Міне осы жүйеден жоғары келтірілген дифференциалдық теңдеуінің ең қарапайым шешімін алуын байқауға болады. Шекаралық шартынан немесе дайындаманың шетінде $\sigma_{y3}=-\sigma_T^*$ қабылдап келтірілген жүйенің бірінші теңдеуінен σ_{y2} мәнін анықтай аламыз.

Мысалы, $b=h=30$ мм, $f=0,3$, $\sigma_T^*=-20$ МПа қабылдайық, сонда жоғары келтірілген алгебралық теңдеулер жүйесінің бірінші теңдеуінен $\sigma_{y2} = -22$ МПа тең болады. Жүйенің екінші теңдеуінен $\sigma_{y1} = -24,2$ МПа мәнін, ал соңғы үшінші теңдеуден $\sigma_{y0} = -26,6$ МПа шамасын анықтаймыз.

Енді осы алынған нәтижелерді жоғары келтірілген Е.Унксов формуласы арқылы есептеп салыстырып көрейік:

$$x=0, \text{ болғанда, } \sigma_y = -\sigma_T^* e^{\frac{f(b-0)}{h}} = -26,99 \approx -27 \text{ МПа};$$

$$x=10 \text{ мм, болғанда, } \sigma_y = -\sigma_T^* e^{\frac{f(b-10)}{h}} = -24,4 \text{ МПа};$$

$$x=20 \text{ мм, болғанда, } \sigma_y = -\sigma_T^* e^{\frac{f(b-20)}{h}} = -22,1 \approx -22 \text{ МПа};$$

$$x=30 \text{ мм, болғанда, } \sigma_y = -\sigma_T^* e^{\frac{f(b-30)}{h}} = -20 \text{ МПа}.$$

Дәл осылай тізбектеп Зибель заңы орын алғанда немесе $\tau_k = -f\sigma_T^*$ берілгенде және τ_k мәні орталықтан сызықты өткен жағдайында шекті айырмашылық жүйесін құрып нормальді кернеулерінің таралуын анықтауға болады. Егер узел арасындағы (i нүктелер арасындағы) аралықты азайтсақ, онда дәлдігі көбейеді және екі әдіспен алынған нәтижелерінің айырмашылығы мәнді азаяды.

Сонымен, шекті айырмашылық әдісімен және Е.Унксов формулаларымен алынған нормальді кернеулерінің айырмашылығы өте аз немесе 1-2 % аспайды, сондықтан отырғызу және т.б МҚӨ үрдістерінде күш-энергия параметрлерін анықтауда осы әдісті қолданған өте ықшамды және ыңғайлы болады деп есептеп және меншікті, толық күштерін анықтауда осы екі әдіс тең құқықты деуге болады және басқадай [3-4] МҚӨ үрдістерінде күш-энергия параметрлерін анықтауда қолдануға болады

ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде металдарды қысыммен өңдеу үрдістеріндегі күш-энергия

64 параметрлерін анықтауда шекті айырмашылық әдісінің тиімділігі теориялық және есептік тұрғыдан дәлелденді. Ұсынылған әдіс дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулерін қарапайым алгебралық теңдеулер жүйесіне түрлендіруге мүмкіндік беріп, күрделі интегралдау және дифференциалдау амалдарын қолданбай-ақ түйісу бетіндегі нормальді кернеулердің таралуын жоғары дәлдікпен анықтауды қамтамасыз етеді.

Е. Унксовтың аналитикалық формуласымен жүргізілген салыстырмалы талдау нәтижесінде есептеу айырмашылығының 1-2 %-дан аспайтыны анықталды, бұл шекті айырмашылық әдісінің жеткілікті дәлдікке ие екенін және оны дәстүрлі аналитикалық тәсілдермен тең дәрежеде қолдануға болатынын көрсетті. Сонымен қатар, әдіс есептеу алгоритмін жеңілдетіп, инженерлік есептеулердің еңбек сыйымдылығын төмендетуге мүмкіндік береді.

Осылайша, шекті айырмашылық әдісі дайындамаларды отырғызу үрдісінде ғана емес, сондай-ақ металдарды қысыммен өңдеудің басқа да технологиялық процестерінде күштік және энергетикалық параметрлерді анықтау үшін тиімді инженерлік құрал ретінде ұсынылады. Болашақ зерттеулерде аталған әдісті күрделі геометриялы дайындамаларға, үшөлшемді кернеулі-деформациялық күй есептеріне және сандық модельдеу бағдарламаларымен біріктіре отырып қолдану оның практикалық мүмкіндіктерін одан әрі кеңейтуге мүмкіндік береді. болады.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар осы зерттеуді орындау және мақаланы жариялау барысында мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

Авторлардың үлесін көрсету (таксономия CRediT): Ашкеев Ж.А. – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, әдіснаманы қалыптастыру, математикалық модельді әзірлеу, зерттеуді жүргізу, нәтижелерді талдау, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау. Аманжолов Н.Ж. – ғылыми жетекшілік, зерттеу әдіснамасын жетілдіру, нәтижелерді тексеру, ғылыми әдебиеттерді талдау, нәтижелерді түсіндіру, мақаланы ғылыми редакциялау және рецензиялау. Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижелерінің дұрыстығына ортақ жауапкершілік алады.

Қаржыландыру. Зерттеу сыртқы қаржыландырусыз орындалды.

Алғыс. Авторлар зерттеуді орындауға ғылыми және ұйымдастырушылық қолдау көрсеткені үшін Қарағанды индустриялық

университетіне алғыс білдіреді, сондай-ақ зерттеудің орындалуына көрсеткен ғылыми кеңестері мен қолдауы үшін барлық әріптестеріне ризашылықтарын білдіреді.

Авторлық құқық © 2026 автор(лар)ға тиесілі. Бұл мақала Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) лицензиясы бойынша ашық қолжетімді болып

табылады. Лицензия түпнұсқа еңбекке тиісті түрде сілтеме жасалған жағдайда, кез келген ортада пайдалануға, таратуға және қайта жариялауға рұқсат береді. Туынды материалдар осы лицензияның дәл осындай шарттарымен таратылуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь; под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. – М.: Машиностроение, 2009. – 442 с.: ил.
- [2] Теория пластичности. Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Учебное пособие для вузов. М.: Металлургия. 1987.352с.
- [3] Ашкеев Ж.А., Андреященко В.А., Абишкенов М.Ж., Буканов Ж.У. Определение напряженного состояния и усилия деформации шарообразных заготовок в закрытой матрице / Вестник ПНИПУ. Механика 4 (2021) 5–12
- [4] Ашкеев Ж.А., Андреященко В.А., Абдираманов С.Т. Исследование процесса закрытой штамповки, реализующей интенсивные пластические деформации // Обработка материалов давлением. – 2018. – № 1. – С. 88–92.

REFERENCES

- [1] Theory of metalworking by pressure: a textbook for universities / V.A. Golenkov, S.P. Yakovlev, S.A. Golovin, S.S. Yakovlev, V.D. Kukhar; edited by V.A. Golenkov, S.P. Yakovlev. – M.: Mashinostroenie, 2009. – 442 p.: ill.
- [2] Theory of plasticity. Arkulis G.E., Dorogobid V.G. A textbook for universities. Moscow: Metallurgiya. 1987.352p
- [3] Ashkeev Zh.A., Andreyashchenko V.A., Abishkenov M.Zh., Bukanov Zh.U. Determination of the stress state and strain force of spherical workpieces in a closed matrix / Bulletin of PNRPU. Mechanics 4 (2021) 5-12
- [4] Ashkeev Zh.A., Andreyashchenko V.A., Abdiramanov S.T. Investigation of the closed stamping process that implements intense plastic deformations // Pressure treatment of materials. – 2018. – No. 1. – pp. 88-92.