DOI 10.52209/1609-1825_2022_3_41 ӘОЖ 621.777.4

Арнайы матрицада сығымдалған дайындамалардың кернеулік күйін талдау

[1]**АШКЕЕВ Жасулан Аманжолович,** *т.ғ.к., доцент, jashkeev@mail.ru,*
[1]***АБИШКЕНОВ Максат Жарылгасынович,** *аға оқытушы, maks91.kz@inbox.ru,*
[1]**РСАЛЫ Бекжан Боранбайұлы,** *магистрант, bekzhan.rsaly.98@mail.ru,*
[1]**САТЫБАЛДЫ Ақерке Хамитқызы,** *магистрант, Akerke2205@mail.ru,*
[1]*«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Теміртау, Республика даңғылы, 30,*
**автор-корреспондент.*

Аңдатпа. *Ұсынылып отырған мақалада жұмыс беті көлбеу арнайы матрицада ұзын өлшемді дайындамаларды сығымдау үрдісін зерттеудің нәтижелері көрсетілген. Зерттеудің мақсаты жұмыс беті көлбеу арнайы матрицада ұзын өлшемді цилиндрлі дайындамаларды сығымдау тәсілін әзірлеу мақсатында кернеулі күйді зерттеу болып табылады. Дайындамалардың кернеулік күйін зерттеу үшін сырғу сызықтар әдісі қолданылған. Арнайы матрицада сығымдау барысында орын алатын кернеулі күйдің сығымдаудың қолданыста бар дәстүрлі сығымдау барысында орын алатын кернеулі күймен салыстырмалы талдау жүргізілді. Зерттеу нәтижелерін талдау арнайы матрицада қарқынды сығушы кернеулер пайда болатындығын және арнайы матрицада өңдеу циклдерінде ультраұсақтүйіршікті (УҰТ) құрылым мен бұйымның қажетті қасиеттерін алу алғышарттарының қалыптасатындығын көрсетті.*

Кілт сөздер: *арнайы матрица, сығымдау, кернеулік күй, деформация, сырғу сызықтары әдісі, көлбеулік бұрышы, цилиндрлі матрица, ығысу, түйіршік, сығушы кернеулер.*

Кіріспе

Қазіргі таңда механикалық қасиеттер кешені жоғары түсті металл дайындамаларын (әсіресе, алюминий) алудың инновациялық үрдістерін әзірлеу мәселелері өзекті болып отыр. Мысалы, алюминий қорытпаларының жеңілдігі, беріктігі, иілгіштігі, жақсы қалыптағыштығы, жоғары жылу өткізгіштігі, Al_2O_3 антитотық қабықшасының арқасында коррозияға төзімділігі, улы еместігі сияқты сипаттамалық қасиеттері оны идеалды конструкциялық материалға айналдырады [1]. Соңғы уақытта қол жеткізу өте қиын алюминий қорытпаларындағы беріктік, пластикалық және қаттылықтың оңтайлы комбинациясын алу [2] үшін жоғары деңгейлі деформацияларды беруге негізделген қарқынды пластикалық деформация (ҚПД) үрдістері кеңінен пайдаланылуда [3-6]. Бұл үрдістер ең алдымен деформацияларды қарқындату және түйіршіктік-дислокациялық факторлардың белсендірілуі есебінен тамаша механикалық қасиеттері бар нанокристалды (НК) және ультраұсақтүйіршікті (УҰТ) материалдарды алуға мүмкіндік береді. Сондықтан осындай сипаттамалар кешенін алу әдістерін әзірлеуге және зерттеуге бағытталған еңбектердің маңыздылығы аса жоғары болып табылады.

Кернеулік-деформациялық күйінің (КДК) оңтайлығына және жоғары өнімділігіне байланысты сығымдау үрдісі металдарды қысыммен өңдеудің өзге технологиялық үрдістеріне қарағанда ғылыми тұрғыдан да, қолданбалылығы жағынан да үлкен қызығушылық тудырып отыр. Әсіресе деформациялауды қарқындату есебінен мүлдем кеуексіз дерлік әрі УҰТ немесе наноқұрылымды көлемді поликристалдық металл материалдар алу тұрғысында сығымдау үрдісі кеңінен қолданылады [4-8].

Авторлардың [9] жұмысында жұмыс беті көлбеу арнайы матрицада сығымдау кезінде дайындаманың КДК зерттеу нәтижелері толық берілген. Арнайы матрицаны сым өндіретін созу стандарының немесе сортты таптау стандарының құрамында немесе ұзын дайындамаларды престеу құралы ретінде орнатуға болады. Зерттеу нәтижелері УҰТ және/немесе НК дайындамаларын алу мүмкіндігін көрсетті, өйткені пластикалық деформация аймағында, әсіресе арнайы матрицаның көлбеу ығысу аймағында негізінен металдың микроқұрылымының ұсақталуына ықпал ететін үлкен қысу кернеулері әсер етеді. Бұл ретте ең оңтайлы негізгі геометриялық және технологиялық параметрлер анықталды, яғни $\alpha = 15 \div 20°$ тең болатын матрицаның жұмыс бетінің көлбеу бұрышы, сондай-ақ дайындаманың диаметрінің d матрицаның көлбеу қимасының ұзындығына z қатынасы $d/z = 1{,}5 \div 2{,}0$. Параметрлердің оңтайлы мәндері сырғу сызықтары әдісімен анықталады.

Бірақ аталған жұмыста ұсынылып отырған

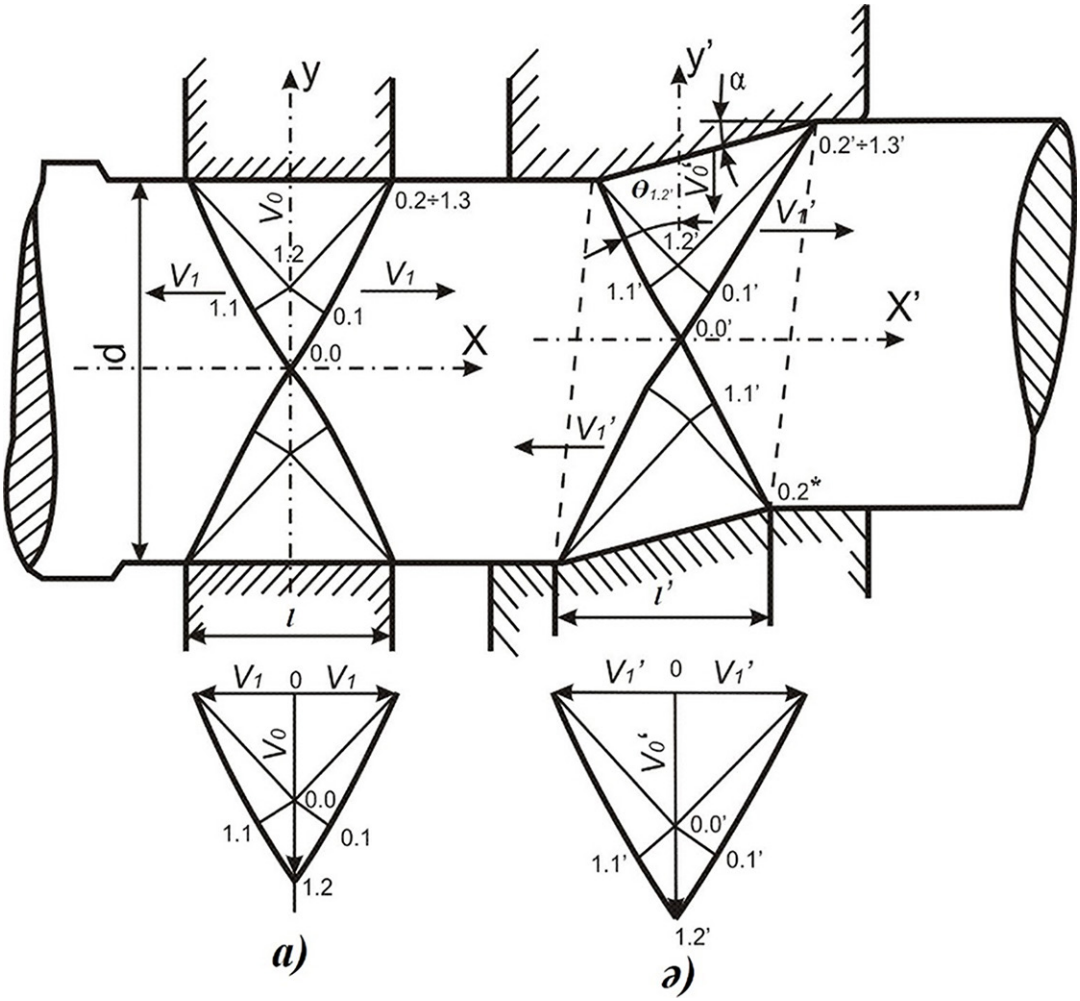
үрдістің ұзын өлшемді дайындамалар алудың дәстүрлі үрдістерімен, мысалы, өндірісте әлі күнге дейін қолданылатын жұмыс беті цилиндрлі матрицаларда ұзын өлшемді дайындамалар алу үшін сығымдау үрдісімен салыстырмалы талдауы жасалмаған. Аталмыш жұмыста дәстүрлі цилиндрлі және арнайы матрицаларда КДК салыстырмалы талдау жасалды.

Теориялық зерттеулер және талдау әдістемесі

Дайындаманы дәстүрлі цилиндрлік және арнайы матрицаларда сығымдау кезіндегі КДК мен жылдамдық параметрлерін салыстырмалы талдауды жүргізу үшін цилиндрлі дайындаманы цилиндрлі матрицада ($\alpha=0$) және ұсынылып отырған арнайы матрицада ($\alpha=15°$) бір уақытта сығымдау кезіндегі сырғу сызықтарының өрісі мен сәйкесінше дайындаманың жылдамдықтар өрісі тұрғызылды (сурет). Цилиндрлі дайындама $\varepsilon\approx5\%$ сығымдау дәрежесіне дейін алдымен цилиндрлі матрицада, артынан ығысу бұрышы $\alpha=15°$ болатын көлбеу жұмыс беті бар арнайы матрицада сығымдалады. Мұнда дайындама мен матрица өлшемдерінің геометриялық қатынастарын бірдей етіп қабылдау қажеттілігін ескеру қажет. Осы шартты ескере отырып $d/l\approx1{,}8$, ал сығымдау дәрежесі $\varepsilon=(d_0-d)/d_0\approx5\%$ шамасында қабылданды (мұндағы d_0 – дайындаманың бастапқы өлшемі, d – дайындаманың соңғы (сығымдалғаннан кейінгі) өлшемі, l – матрицаның көлбеу қимасының ұзындығы). Арнайы матрицаның жұмыс арнасынан өтіп сығымдалғанда дайындаманың диаметрі мүлдем дерлік өзгермейтіндігін, яғни дайындама тек ығысу деформациясының әсеріне ұшырайтындығын атап айтқан жөн.

Сырғу сызықтарының өрісін тұрғызу әдістемесі [9, 10] жұмыста келтірілген.

Бұрыштары $\alpha=0$ және $\alpha=15°$ болатын матрицаларда дайындаманы сығымдаған кездегі сырғу сызықтарының түйінді нүктелеріндегі кернеулердің мәндері пластикалық аймаққа оң жақтан түсірілетін барлық күштердің тепе-теңдік шартынан анықталды. Бұрышы $\alpha=0$ болатын дәстүрлі цилиндрлік матрица үшін тепе-теңдік теңдеуін немесе шартын келесідей жазуға болады:



Дайындаманы а) α = 0 болатын дәстүрлі цилиндрлі матрицада және б) ығысу бұрышы α = 15° болатын көлбеу жұмыс беті бар арнайы матрицада сығымдау кезіндегі сырғу сызықтарының өрісі мен сәйкесінше жылдамдықтар годографы

$$\int_{0.0}^{0.1} \sigma dy + \sigma_{0.1}(y_{0.2} - y_{0.1}) + kx_{0.2} = 0, \qquad (1)$$

мұндағы (Генки қатынастары бойынша)

$$\left.\begin{aligned} \sigma &= \sigma_{0.0} - 2k\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) \\ \sigma_{0.1} &= \sigma_{0.0} - 2k\left(\theta_{0.1} - \frac{\pi}{4}\right) \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

(1) және (2) өрнектерде келтірілген шамалар келесідей: σ – 0.0 және 0.1 сырғу сызықтарының бойындағы орташа кернеу; $\sigma_{0.0}$ және $\sigma_{0.1}$ – сәйкесінше, 0.0 және 0.1 түйінді нүктелердегі орташа кернеулер; $y_{0.1}$, $y_{0.2}$ және $x_{0.2}$ – сәйкесінше, 0.0, 0.1 және 0.2 түйінді нүктелерінің координаталары; θ және $\theta_{0.1}$ – сәйкесінше, 0.0 және 0.1 түйінді нүктелерінің бойындағы сырғу сызықтарына жанама мен у бас осінің арасындағы бұрыштың орташа мәні және 0.1 түйінді нүктесіндегі сырғу сызығына жанама мен у бас осінің арасындағы бұрыштың орташа мәні; k – сығымдалатын материалдың пластикалық тұрақтысы немесе ығысуға аққыштық шегі. Осы көрсетілген барлық шамалардың мәндері тікелей а-суреттен алынады да соңғы шыққан теңдеуге қойылады.

(2) өрнекті (1) өрнектегі сәйкес шамалардың орындарына қойып келесі өрнек алынады:

$$\begin{aligned} &-2k\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right)y_{0.1} + \sigma_{0.0}y_{0.2} - \\ &-2k\left(\theta_{0.1} - \frac{\pi}{4}\right)(y_{0.2} - y_{0.1}) + kx_{0.2} = 0. \end{aligned} \qquad (3)$$

$2k$ қысқартқан соң, сәйкесінше түрлендірулерді орындаған соң және сәйкес мәндерді суреттен тікелей қою арқылы келесі өрнек шығады:

$$\frac{\sigma_{0.0}}{2k} = 0,0226. \qquad (4)$$

0.0 түйінді нүктесіндегі кернеулердің компоненттері (құраушылары) келесі формулалар бойынша анықталады [9]:

$$\sigma x_{0.0} = \sigma_{0.0} + k \cdot \sin 2 \cdot \theta_{0.0}, \qquad (5а)$$

$$\sigma y_{0.0} = \sigma_{0.0} - k \cdot \sin 2 \cdot \theta_{0.0}, \qquad (5ә)$$

мұнда $\theta_{0.0}$ – 0.0 түйінді нүктесінде сырғу сызығына түсірілген жанама мен x бас осінің арасындағы мәні 45°-қа тең болатын бұрыш. Осы мәнді орнына қойып және сәйкес түрлендірулерді орындағанда берілген нүктедегі кернеулердің компоненттері келесідей болады:

$$\sigma_x = 2k \cdot 0,5226, \qquad (6а)$$

$$\sigma_y = -2k \cdot 0,4774. \qquad (6ә)$$

Авторлармен ұсынылып отырған ығысу бұрышы $\alpha = 15°$ болатын жұмыс беті көлбеу матрицада сығымдау кезінде мүлдем басқа көрініс орын алады. $\alpha = 0$ болған жағдайдағы 0.0 осьтік түйінді нүктесінде алынған кернеулердің баламалы мәндерімен салыстыру үшін жоғарыда цилиндрлі матрица үшін құрылғандай тәртіпте пластикалық аймаққа оң жақтан түсірілген барлық күштердің тепе-теңдік шарты жазылады:

$$\begin{aligned} &\int_{0.0}^{0.1} \sigma' dy + \sigma_{0.1'}(y_{0.2'} - y_{0.1'}) + kx_{0.2'} + \\ &+ \int_{1.1^*}^{0.0} \sigma^* dy + \sigma_{1.1^*}(y_{1.1^*} - y_{0.2^*}) + kx_{0.2^*} = 0, \end{aligned} \qquad (7)$$

мұндағы сәйкесінше мәндер (1) және (2) теңдеулерде көрсетілген мәндерге баламалы болып табылады, бірақ олармен салыстырғанда штрихпен және жұлдызшамен белгіленген. Қарастырылып отырған жағдай үшін Генки қатынастары келесідей жазылады:

$$\begin{aligned} \sigma' &= \sigma_{0.0} - 2k\left(\theta' - \frac{\pi}{4}\right), \\ \sigma_{0.1'} &= \sigma_{0.0} - 2k\left(\theta_{0.1'} - \frac{\pi}{4}\right), \\ \sigma^* &= \sigma_{0.0} + 2k\left(\theta^* - \frac{\pi}{4}\right), \\ \sigma_{1.1^*} &= \sigma_{0.0} + 2k\left(\theta_{1.1^*} - \frac{\pi}{4}\right). \end{aligned} \qquad (8)$$

(8) өрнектердегі Генки қатынастарының мәндерін (7) тепе-теңдік теңдеуіндегі мәндерге сәйкесінше қою, одан соң қажетті түрлендірулерді орындау және соңында б-суреттегі қажетті мәндерді тікелей қою арқылы келесі өрнек шығады:

$$\frac{\sigma_{0.0}}{2k} = -1,70. \qquad (9)$$

Зерттеу нәтижелерін талдау

Есептеулер көрсеткендей, дәстүрлі матрицада сығымдау кезіндегі 0.0 түйінді нүктесіндегі кернеулі күйді есептеу орташа кернеудің және кернеу компоненттерінің бірінің ($\sigma_{x0.0}$) аз дәрежеде болса да созушы екендігін аңғартады. Созушы кернеулердің пайда болуы заңды, себебі $\alpha = 0$ болатын цилиндрлі матрицаларда сығымдағанда сығушы күштер дайындаманың ортасында, яғни осьтік аймақта шоғырланады да горизонталь бағытта созушы кернеулерді туғызады. Өз кезегінде созушы кернеулер осьтік аймақта жарылулар мен борпылдақтылықтардың туындауына алып келуі мүмкін, сондай-ақ осьтік бағытта түйіршіктердің (кристаллиттердің) созылуына да әкеліп соқтыруы мүмкін. Түйіршіктердің шамадан тыс созылуы өз кезегінде дайындаманың (дәлірек айтқанда сығымдалған дайындаманың немесе жолақтың) бойлық және көлденең бағыттардағы механикалық қасиеттерінің әркелкілігіне алып келуі мүмкін.

Есептеулер көрсеткендей, ығысу бұрышы $\alpha = 15°$ болатын жұмыс беті көлбеу матрицада дайындаманы сығымдаған кезде 0.0 түйінді нүктесіндегі орташа кернеудің мәндері сығушы бо-

лып табылады және $\alpha=0$ болатын дәстүрлі цилиндрлі матрицада дайындаманы сығымдаған кездегі 0.0 түйінді нүктесіндегі сәйкесі орташа кернеудің мәндерінен 2 еседей жоғары болады. Сығушы кернеулер металдың осьтік аймағындағы бұзылулардың, жарылулардың пайда болу ықтималдылығын азайтады, сондай-ақ металдың барлық ішкі ақауларының жойылуына және «жазылуына» оң септігін тигізеді. Соңғы артықшылық әсіресе дәстүрлі технологиялармен құйылған және үздіксіз құйылған дайындамаларды өңдеу тұрғысында пайда келтіретіндігі сөзсіз. Бұдан бөлек, арнайы матрицада сығымдау кезінде пайда болатын сығушы кернеулер материалдың (металдың) осьтік бағытында түйіршіктердің шамадан тыс созылуын болдырмайды және неғұрлым біртекті құрылым алуға мүмкіндік береді.

Арнайы матрицада сығымдау кезіндегі кернеулі күйдің сығушы сипатқа қарай өзгерістерін немесе бетбұрысын вертикаль сығушы күштердің горизонталь бағытқа қарай біртіндеп ығысуы, нәтижесінде горизонталь құраушылардың азаюы арқылы түсіндіруге болады. Бұдан бөлек, горизонталь құраушылар вертикаль ығысқан сығушы күштермен бірге созушы кернеулерді азайтады.

Жылдамдық параметрлерінің өзгерісін жылдамдықтар годографтары бойынша талдауға болады (сурет). Жылдамдықтар годографынан ығысу бұрышы $\alpha=15°$ болатын жұмыс беті көлбеу матрицада дайындаманы сығымдаған кезде пластикалық деформация орын алатын аймақтағы (деформация ауқымындағы) нүктелердің жылдамдықтары матрицаның көлбеу учаскесіндегі ығысу есебінен артатындығын байқауға болады. Мұнда осьтердің центрлері шамалы ығысады, ал дайындаманың диаметрі мүлдем дерліктей өзгермейді немесе елеусіз дәрежеде ғана өзгереді. Сондықтан жылдамдықтар матрица каналдарының (арналарының) көлденең қималарының азаюы есебінен емес, ығысу учаскесіндегі ығысу деформацияларының есебінен артады.

Қорытынды

1. Ұсынылып отырған ығысу бұрышы $\alpha=15°$ болатын жұмыс беті көлбеу арнайы матрицада сығымдау үрдісінде материалдың құрылымын ұсақтауға, біртекті құрылым алуға және осылар арқылы механикалық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік беретін сығымдау технологиясын әзірлеуге болады.

2. Сырғу сызықтары әдісімен дәстүрлі цилиндрлі және арнайы матрицаларда кернеулік күйді зерттеу цилиндрлі матрицаларда сығымдауға қарағанда арнайы матрицада сығымдау кезінде сығушы кернеулердің 2 еседей жоғары екендігін көрсетті.

3. Арнайы матрицада сығымдау нәтижесінде: а) сығушы кернеулердің қарқындылығы жоғары; ә) вертикаль сығушы күштер горизонталь бағытқа қарай біртіндеп ығысып горизонталь құраушылар азаяды да горизонталь құраушылар вертикаль ығысқан сығушы күштермен бірге созушы кернеулерді азайтады; б) деформация ауқымындағы нүктелердің жылдамдықтары матрицаның көлбеу (ығысу) учаскесіндегі ығысу деформацияларының әсері есебінен артады.

4. Арнайы матрицада сығымдау кезіндегі кернеулі күйді зерттеу нәтижелері УҰТ және механикалық қасиеттері жоғары материалдар алуға алғышарттар тудырады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Ahmad Z. Aluminium Alloys – New Trends in Fabrication and Applications. – Rijeka: InTech, 2012. – 368 p.
2. Zha M., Li Y., Mathiesen R.H., Bjørge R., Roven H.J. Achieve high ductility and strength in an Al-Mg alloy by severe plastic deformation combined with inter-pass annealing // Materials Science and Engineering: A. – 2014. – No. 598. – pp. 141-146.
3. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2014. – 440 p.
4. Bagherpour E., Pardis N., Reihanian M., Ebrahimi R. An overview on severe plastic deformation: research status, techniques classification, microstructure evolution, and applications // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – No. 100. – pp. 1647-1694.
5. Segal V. Review: Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD) // Materials. – 2018. – Vol. 11. – No. 7. – pp. 1175-1204.
6. Harsha, R.N., Kulkarni, V.M., Babu, B.S. Severe Plastic Deformation: A Review // Materials Today: Proceedings. – 2018. – No. 5. – pp. 22340-22349.
7. Старостин Ю.С. Инновационные технологии на основе прессования: учебное пособие / Под ред. Ю.С. Старостина. – Самара: Издательство СГАУ, 2007. – 64 с.
8. Логинов Ю.Н. Прессование как метод интенсивной деформации металлов и сплавов: учебное пособие / Под ред. В.А. Шилова. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2016. – 156 с.
9. Ashkeyev, Z., Abishkenov, M., Mashekov, S., Kawałek, A. Stress state and power parameters during pulling workpieces through a special die with an inclined working surface // Engineering Solid Mechanic. – 2021. – No. 9 (2). – pp. 161-176.
10. Dixit P.M., Dixit, U.S. Plasticity: Fundamentals and Applications. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 602 p.

Анализ напряженного состояния заготовок, протягиваемых в специальной матрице

[1]***АШКЕЕВ Жасулан Аманжолович,*** *к.т.н., доцент, jashkeev@mail.ru,*
[1]****АБИШКЕНОВ Максат Жарылгасынович,*** *старший преподаватель, maks91.kz@inbox.ru,*
[1]***РСАЛЫ Бекжан Боранбайұлы,*** *магистрант, bekzhan.rsaly.98@mail.ru,*
[1]***САТЫБАЛДЫ Ақерке Хамитқызы,*** *магистрант, Akerke2205@mail.ru,*
[1]*НАО «Карагандинский индустриальный университет», Казахстан, Темиртау, пр. Республики, 30,*

**автор-корреспондент.*

Аннотация. *В работе представлены результаты исследования процесса протягивания длинномерных заготовок в специальной матрице с наклонной рабочей поверхностью. Целью исследования является исследование напряженного состояния заготовок при протягивании длинномерных цилиндрических заготовок в специальной матрице с наклонной рабочей поверхностью. Для исследования напряженного состояния заготовок использован метод линий скольжения. Произведен сравнительный анализ с существующими способами протягивания. Анализ результатов исследования показал возникновение интенсивных сжимающих напряжений, создающих предпосылки для достижения ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры и требуемых качеств изделия.*

Ключевые слова: *специальная матрица, протягивание, напряженное состояние, деформация, метод линий скольжения, угол наклона, цилиндрическая матрица, сдвиг, зерно, сжимающие напряжения.*

Analysis of the Stress State of Workpieces Pulled in a Special Die

[1]***ASHKEYEV Zhassulan,*** *Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, jashkeev@mail.ru,*
[1]****ABISHKENOV Maxat,*** *Senior Lecturer, maks91.kz@inbox.ru,*
[1]***RSALY Bekzhan,*** *master student, bekzhan.rsaly.98@mail.ru,*
[1]***SATYBALDY Akerke,*** *master student, Akerke2205@mail.ru,*
[1]*NCJSC «Karaganda Industrial University», Kazakhstan, Temirtau, Republic Avenue, 30,*

**corresponding author.*

Abstract. *The article presents the results of a study of the process of broaching long workpieces in a special die with an inclined working surface. The aim of the study is to study the stress state of workpieces when pulling long cylindrical workpieces in a special die with an inclined working surface. To study the stress state of the workpieces, the method of slip lines was used. A comparative analysis with the existing methods of broaching has been made. Analysis of the research results showed the occurrence of intense compressive stresses and create preconditions for achieving an ultrafine-grained (UFG) structure and the required product qualities.*

Keywords: *special die, pulling, stress state, deformation, slip line method, tilt angle, cylindrical die, shear, grain, compressive stresses.*

REFERENCES

1. Ahmad Z. Aluminium Alloys – New Trends in Fabrication and Applications. – Rijeka: InTech, 2012. – 368 p.
2. Zha M., Li Y., Mathiesen R.H., Bjørge R., Roven H.J. Achieve high ductility and strength in an Al-Mg alloy by severe plastic deformation combined with inter-pass annealing // Materials Science and Engineering: A. – 2014. – No. 598. – pp. 141-146.
3. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2014. – 440 p.
4. Bagherpour E., Pardis N., Reihanian M., Ebrahimi R. An overview on severe plastic deformation: research status, techniques classification, microstructure evolution, and applications // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – No. 100. – pp. 1647-1694.
5. Segal V. Review: Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD) // Materials. – 2018. – Vol. 11. – No. 7. – pp. 1175-1204.
6. Harsha, R.N., Kulkarni, V.M., Babu, B.S. Severe Plastic Deformation: A Review // Materials Today: Proceedings. – 2018. – No. 5. – pp. 22340-22349.
7. Starostin YU.S. Innovacionnye tekhnologii na osnove pressovaniya: uchebnoe posobie / Pod red. YU.S. Starostina. – Samara: Izdatel'stvo SGAU, 2007. – 64 p.
8. Loginov YU.N. Pressovanie kak metod intensivnoj deformacii metallov i splavov: uchebnoe posobie / Pod red. V.A. SHilova. – Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2016. – 156 p.
9. Ashkeyev, Z., Abishkenov, M., Mashekov, S., Kawałek, A. Stress state and power parameters during pulling workpieces through a special die with an inclined working surface // Engineering Solid Mechanic. – 2021. – No. 9 (2). – pp. 161-176.
10. Dixit P.M., Dixit, U.S. Plasticity: Fundamentals and Applications. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 602 p.