

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

FTAMP 55.16.17
ЭОЖ 621.73.043

DOI [10.53002/029](https://doi.org/10.53002/029)

М.Ж.Абишкенов, Е.С.Бестембек, С.Кулидан

*Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан
(E-mail: m.abishkenov@tttu.edu.kz)*

Циклдік жабық штамптау процесіндегі материал ағыстарының сипаттамаларын сандық модельдеу арқылы зерттеу

Соғу-штамптау технологиялары саласындағы мақсаттардың бірі процесті жеңілдету және бастапқы немесе бастапқыға өте жақын дайындаманың өлшемі мен пішінін деформациялық цикл аяқталғаннан кейін сақтай алатын процестерді әзірлеу болып табылады. Мұндай процестерді әзірлеудегі соңғы жетістіктерді ескере отырып, осы мақалада ауыспалы циклдік жүктемені қамтамасыз ететін жабдықтың құрылымын жасауға әрекет жасалып, циклдік жабық штамптау (ЦЖШ) тәсілі ұсынылды. ЦЖШ тәсілінің бастапқы бағалауын жүргізу және 6061-T4 алюминий қорытпасының ЦЖШ кезіндегі пластикалық ағысын зерттеу үшін DEFORM-3D коммерциялық FEM бағдарламасы арқылы ақырлы элементтер әдісімен (FEM) сандық модельдеу жүргізілді. Негізгі назар металл ағынының сипаттамаларына аударылды. Модельдеу ЦЖШ тәсілінде металда диагональды және құйын тәрізді ағындардың орын алатынын, ағындардың сипаты біркелкі еместігін көрсетті.

Кілт сөздер: ақырлы элементтер әдісі (FEM), циклдік жабық штамптау (ЦЖШ) тәсілі, металл ағыстары, 6061-T4 алюминий қорытпасы, DEFORM-3D.

Kipicne

Қазіргі уақытта ең танымал баламалы қысыммен өңдеу әдістері – қарқынды пластикалық деформация (ҚПД) деп аталатын әдістер жиынтығы. Бұл әдістердің дәстүрлі қысыммен өңдеу әдістерімен салыстырғанда басты артықшылығы – кристаллиттердің немесе түйіршіктердің нанокристалдық деңгейге дейін қарқынды ұсақталуы және күрделі деформация режимдерінің қолданылуы нәтижесінде [1] көптеген өндірістік металл материалдардың эксплуатациялық қасиеттерін айтарлықтай жақсартуға мүмкіндігі. [2] еңбекте Сегал ҚПД процестері тән ықтимал деформация режимдерінің таза ығысу мен қарапайым ығысудан тұратынын атап өтеді: мұнда таза ығысу дәстүрлі қысыммен өңдеу процестері үшін қолайлы болып саналады, ал қарапайым ығысу материал құрылымын түрлендіру және оны қарқынды ұсақтау үшін оңтайлы болып табылады. Осы екі жағдайда да, дәстүрлі қысыммен өңдеумен салыстырғанда жоғары қасиеттер кешеніне ие металл материалдарды алу үшін материалға белгілі бір шектен жоғары эквивалентті деформация берілуі қажет деп есептеледі.

ҚПД процестерінің тиімділігін негіздеу үшін, ең алдымен, материалдағы кернеу мен деформация сияқты негізгі механикалық параметрлерді, олардың таралуын және ағу сипаттамаларын талдау және бағалау ерекше маңызды рөл атқарады [2]. Мұндай талдаулар үшін металды қысыммен өңдеу процестерінде көбінесе сырғу сызықтары әдісі [3, 4], ақырлы элементтер әдісімен (FEM) сандық модельдеу [5, 6], термомеханикалық симуляторларды қолданатын физикалық модельдеу [7, 8] және модельдік материалдармен модельдеу [9, 10] сияқты түрлі әдістер қолданылады. Олардың ішінде ең өнімдісі – FEM әдісі арқылы жүзеге асырылатын сандық модельдеу; ол қазіргі таңда DEFORM-3D сияқты жетілдірілген және қуатты компьютерлік симуляциялық бағдарламалар арқылы орындалады. Бұл бағдарлама дискреттелген бейсызық алгебралық теңдеулердің итерациялық шешіміне негізделген, ал бұл теңдеулер өз кезегінде вариациялық әдісті қатты тұтқыр-пластикалық теңдеулерге қолдану арқылы алынған жалпы теңдеулерден түрлендірілген [11]. Бұл теңдеулер пластикалық деформацияның негізгі шарттары және/немесе гипотезаларына сәйкес келеді және металды қысыммен өңдеу процестеріндегі қатты тұтқыр-пластикалық денелердің қасиеттерін сипаттайтын кернеу, деформация,

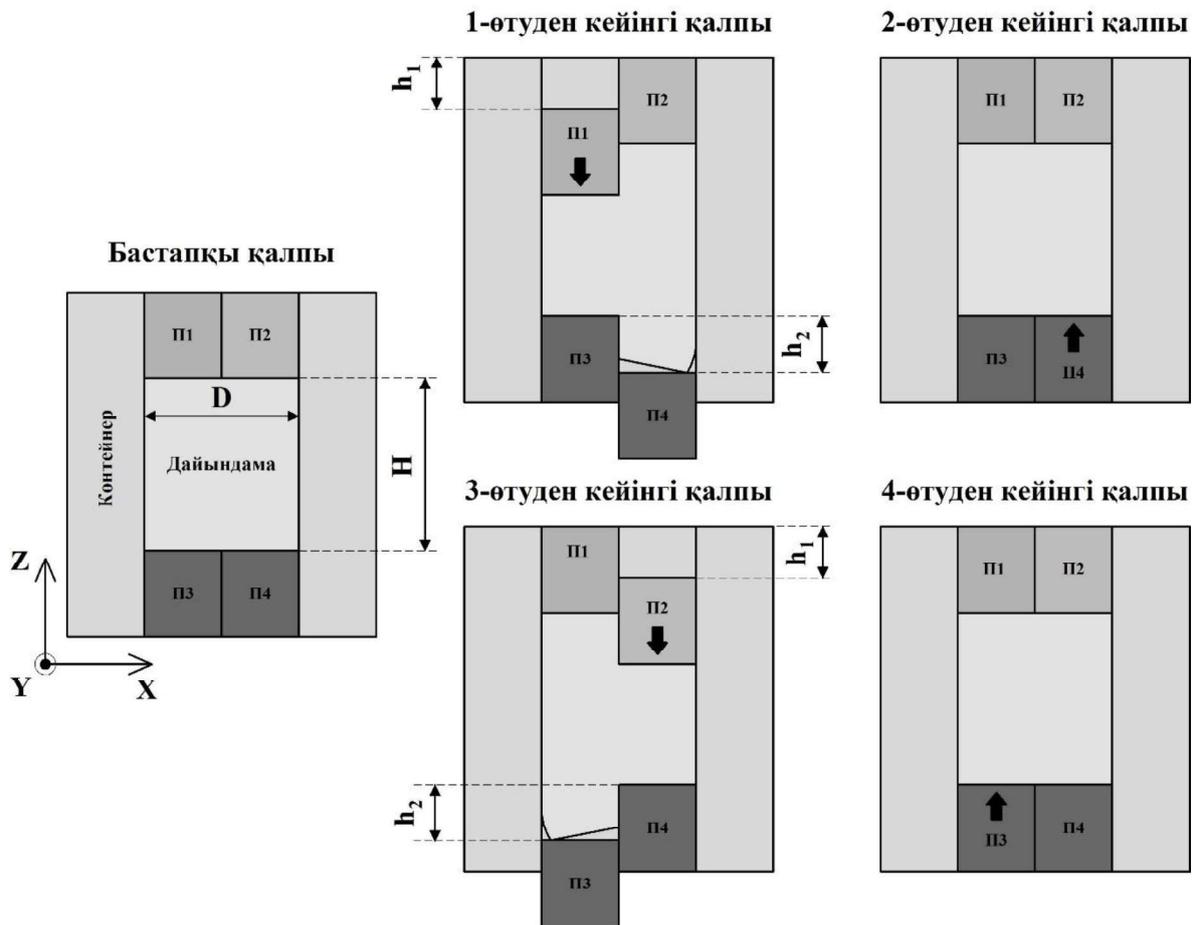
Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

жылдамдық, күш, температура сияқты барлық негізгі параметрлерді қамтиды.

Ұсынылып отырған зерттеудің негізгі мақсаты – деформация циклі аяқталғаннан кейін бастапқы немесе бастапқыға өте жақын өлшем мен пішіндегі металл материал алу мүмкіндігі бар, қарапайымдылығымен ерекшеленетін циклдік жабық штамптау (ЦЖШ) тәсілінің әлеуетін ғылыми тұрғыдан бағалау. Бұл мақсатқа қол жеткізу үшін 6061-Т4 алюминий қорытпасының мысалында ағу сипаттамаларын соңғы элементтік талдау арқылы зерттеу көзделеді.

Зерттеу әдістемесі

ЦЖШ процесінің схемасы сурет 1 көрсетілген. ЦЖШ іске асыруға арналған құрылғының қарапайымдатылған құрылысы қуысына диаметрі D және биіктігі H болатын цилиндрлік дайындама орналастырылатын контейнерден, бірдей өлшемдегі төрт жартылай цилиндр пішінді пуансондардан (П1, П2, П3, П4) тұрады.



Сурет 1. ЦЖШ тәсілінің схемасы (өтулері)

ЦЖШ процесінің бір толық циклі төрт өтуден тұрады және олар пуансондармен кезектесіп орындалады. 1 және 3 өтулер П1 және П2 пуансондардың h_1 жүрісімен орындалады, бұл кезде диагональ бойынша қарама-қарсы орналасқан немесе П1 және П2 пуансондарына қатысты нүктелік инверсияланған П4 және П3 пуансондары бекітілмеген күйде болады, ал қалған екі пуансон бекітілген күйде болады (сурет 1). Нәтижесінде пайда болған материал ағынымен артық материал бекітілмеген пуансондардың қуысына h_2 қашықтыққа ығыстырылады, бұл 2 және 4-өтулерде тиісінше П4 және П3 пуансондармен қайтадан итеріледі, осылайша дайындаманың бастапқы немесе бастапқыға барынша жақын өлшемдері қалпына келтіріледі. 2 және 4-өтулерде белсенді пуансоннан басқа қалған үшеуі бекітілген күйде қалады. ЦЖШ процесі дайындаманы контейнер қуысында бұрамастан немесе

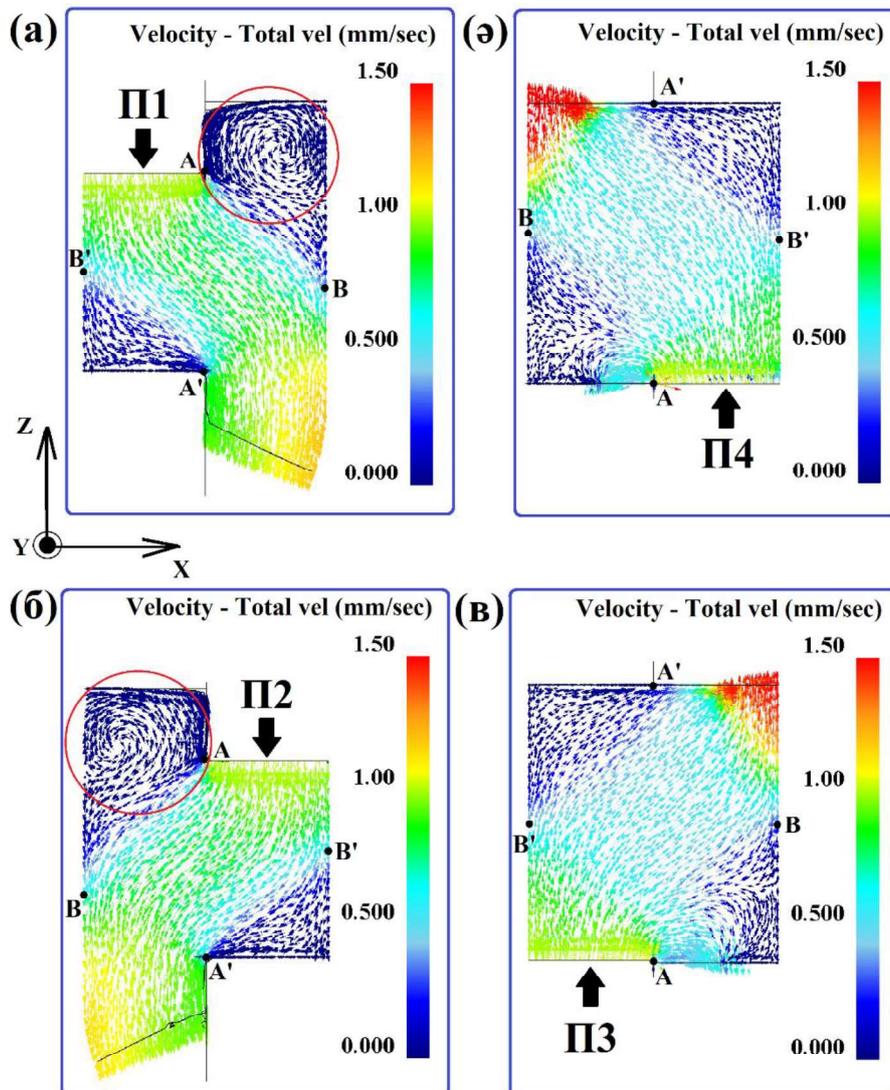
Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

шығармастан орындалады.

Осы зерттеуде ЦЖШ процесін сандық модельдеу үшін коммерциялық DEFORM-3D ақырлы элементтік әдіс (FEM) коды қолданылды. DEFORM-3D бағдарламасындағы ақырлы элементтік талдаудың (FEA) негізгі параметрлері келесідей (сурет 1 бойынша): $D = 40$ мм, $H = 45$ мм, дайындама материалы – 6061-T4 алюминий қорытпасы, үйкеліс коэффициенті 0,12 (тұрақты), температура режимі – салқиндай. Қажетсіз ығысуды және h_2 параметрінің шамадан тыс артуын болдырмау үшін, бұл зерттеуде П1 және П2 пуансондардың жүрісінің максималды шамасы ретінде $h_1 \sim 0.25H \sim 12$ мм таңдалды. 1 және 3-өтулерді модельдеуден кейін $h_2 \sim 17$ мм екені анықталды. Процесс пуансондардың жылдамдығы $v = 1$ мм/с тұрақты мәнінде модельденді.

Нәтижелер және нәтижелерді талқылау

Сурет 2 ЦЖШ процесі кезіндегі жылдамдық өрісінің таралуын сипаттайды. Айнымалы жүктеме жағдайында материал бөлшектерінің жылдамдығы айтарлықтай өзгереді және ең үлкен жылдамдықтағы негізгі ағындар диагональ бойынша орналасқан пуансондардың арасында қалыптасатыны байқалды.



Сурет 2. ЦЖШ процесінің 1 (а), 2 (ә), 3 (б) және 4 (в) өтулерінен кейінгі металл ағыстарының сипаты. Қызыл шеңберлермен генерацияланған құйын ағындары көрсетілген.

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

Барлық төрт өтуде үш бөлек ағыс немесе локализацияланған ағындар байқалады, олардың ішінде негізгі диагональды ағыс және оның жоғары және төменгі жағынан шартты түрде қалыптасқан екі ағыс бар. Сурет 2 негізгі ағыстың және екі басқа ағынның шартты шекаралары А мен В, А' мен В' нүктелерінің арасында орналасқанын байқатады. Мұнда А және А' – сәйкесінше негізгі белсенді пуансонның және оған диагональ бойынша орналасқан, бекітілмеген пуансонның ұштық нүктелері болып табылады, ал В және В' – металл контейнердің бетімен жанасатын бүйірлік нүктелері, олар шамамен осы беттің ортасында орналасқан. Бұл нүктелер – диагональды ағыс аймағы мен оның екі жағында орналасқан шартты түрде бөлінген үш аймақтың шекаралары болып табылады. Бұл аймақтардың шартты шекаралары А мен В', А' мен В нүктелерінің арасында орналасқан, яғни АВА'В' төртбұрышымен шартты түрде шектелген аймақ – диагональды ағыс аймағы, ал АВ' және А'В кесінділерінің жоғары және төмен жағындағы үшбұрышты аймақтар диагональсыз ағыс аймақтарын білдіреді, мұнда қысу жүктемесі жағдайында олардың жылдамдық векторлары немесе ағу бағыттары Z осіне параллель.

Сурет 2(а) және 2(б) негізгі ағыстың мұндай аймақтарға бөлінуі көбінесе бірінші және екінші белсенді пуансондардың жүктемесі әсерінен болатын пластикалық деформацияның диагональды немесе эксцентрикалық сипатына байланысты, ал үшінші және төртінші пуансондардың бекітілмеген немесе пассивті күйде болуы материал бөлшектерінің бос қуысқа қарай қозғалуына ықпал ететінін аңғартады. Ұқсас жағдай 2 және 4-өтулерде де байқалады: 2(ә) және (в) суреттерінен көріп тұрғанымыздай, төртінші және үшінші белсенді пуансондардың жүктемесі салдарынан материал бөлшектері бос қуысқа қозғалады немесе 1 және 3-өтулерде бірінші және екінші пуансондармен қалыптасқан қуысты толтыруға ұмтылады. ЦЖШ процесінде геометриялық параметрлер мен жүктеме ерекшеліктерімен қатар, арматура элементтері мен дайындама материалы арасындағы үйкеліс жағдайлары да маңызды рөл атқарады. 2(а) және (б) суреттерінен бірінші және екінші белсенді пуансондардың қозғалысы кезінде металл бөлшектері тиісінше 1 және 3-өтулерде белсенді емес және бекітілген екінші және бірінші пуансондардың астында орналасқан жағдайда, белсенді пуансондар тудырған негізгі диагональды ағыстан радиалды тартылыс алып, контейнердің, белсенді және белсенді емес пуансондардың беттерімен шектелген аймаққа ағады, нәтижесінде үйкеліс әсерінен суретте қызыл шеңбермен белгіленген, АВ кесіндісінің үстінде орналасқан құйын тәрізді ағындар пайда болады. Liu және басқалар [12] еңбекте осындай құйын ағындарын баламалы (танбаауыспалы) экструзия процесінде де байқаған. 2(ә) және (в) суреттері АВ шартты кесіндісінің астында құйын ағындарының бастамасы қалыптасып жатқанын көрсетеді және егер төртінші және үшінші белсенді пуансондардың қозғалысы 1 және 2-өтулердегідей жалғастырылса, онда бұл аймақтарда да айқын құйын ағындары пайда болады деп айтуға болады.

Бірқатар авторлар әртүрлі пластикалық деформациялау әдістерін зерттеу барысында осындай құйын тәрізді ағындарды байқағанын хабарлайды. Kulagin және тең авторлар [13] еңбекте биметалл ламинатын ығыстыра бұрау әдісімен өңдеу кезінде мұндай ағындарды бақылап, құйын тәрізді ағындардың ығысу деформациясының локалдық тежелуінен туындаған пластикалық тұрақсыздықтар салдарынан пайда болатынын атап өтті. Beygelzimer және тең авторлар [14] еңбекте винтті экструзия процесінде үлкен деформация градиентімен құйын тәрізді ағындарды байқады және мұндай ағындардың кинематикасының ерекшеліктері металл бөлшектерін созып, араластыруға мүмкіндік беретінін және бұл жаңа микроқұрылымдарды зерттеуге әрі қалыптастыруға жол ашатынын тұжырымдады. Бұл жұмыста авторлар Al, Cu және Ti қорытпаларында жақсы қасиеттері бар ультраұсақ түйіршікті микроқұрылымдарды алу үшін құйын тәрізді ағынның ерекшеліктерін сәтті пайдалану мысалдарын келтіреді. Металл реологиясы мен үйкеліс жағдайларын ескере отырып, құйын тәрізді ағындардың күрделі кинематикасы [15] жұмыста жеке қарастырылған.

Сондай-ақ, құйынды экструзия әдісін [16] атап өткен жөн; мұнда құралдың геометриясы құйын тәрізді ағындарды жасауға толықтай бағытталған және бұл олардың «қасиет–микроқұрылым» арақатынасы тұрғысынан тиімді мүмкіндіктерін пайдалануға негізделген. Сондықтан, ЦЖШ тәсілінде құйын тәрізді ағындарды, сондай-ақ негізгі ағын бағытының ауысып отыруын іске асыру алдағы уақытта қажетті микроқұрылымды тиімді қалыптастыруға және оның оңтайлы пайдалану қасиеттеріне қол жеткізуге мүмкіндік береді деп алдын ала тұжырымдауға болады.

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижелері ЦЖШ (циклдік жабық штамптау) тәсілінің металл материалдардың құрылымын түрлендіруге және қасиеттерін жақсартуға бағытталған қарқынды пластикалық деформация (ҚПД) әдістерінің перспективалы түрі екенін дәлелдеді. Сандық модельдеу арқылы алынған мәліметтер деформация процесінің күрделі сипатқа ие екенін, оның ішінде материал ағысының негізгі бағыттарының диагональ бойынша ұйымдастырылатынын және белсенді пуансондар әрекетіне байланысты локализацияланған ағындар мен құйын тәрізді қозғалыстардың пайда болатынын көрсетті.

Зерттеу барысында алынған жылдамдық өрістерінің, деформация аймақтарының және құйын ағындарының талдауы ЦЖШ процесінің тиімділігіне үйкеліс, пуансон жүрісі және дайындама геометриясының айтарлықтай әсер ететінін көрсетті. Бұл нәтижелер ЦЖШ тәсілін құрылымдық ұсақталу мен біркелкі деформацияға қол жеткізу үшін тиімді құрал ретінде қолдану мүмкіндігін айқындайды.

Жалпы бұл жұмыс ЦЖШ әдісінің ғылыми негізделуіне және оны практикалық қолдануға бағытталған болашақ зерттеулерге берік платформа қалыптастырады. Сонымен қатар, алынған нәтижелер ҚПД әдістерін қолдану арқылы металл материалдардың құрылымдық қасиеттерін оңтайландыруға бағытталған жаңа технологиялық шешімдер ұсынуға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1 Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V.A., Beygelzimer Y., Blank V.D., Botta W.J., Bryła K., Čížek J., Divinski S., Enikeev N.A., Estrin Y., Faraji G., Figueiredo R.B., Fuji M., Furuta T., Grosdidier T., Gubicza J., Hohenwarter A., Horita Z., Huot J., Ikoma Y., Janeček M., Kawasaki M., Král P., Kuramoto S., Langdon T.G., Leiva D.R., Levitas V.I., Mazilkin A., Mito M., Miyamoto H., Nishizaki T., Pippan R., Popov V.V., Popova E.N., Purcek G., Renk O., Révész Á., Sauvage X., Sklenicka V., Skrotzki W., Straumal B.B., Suwas S., Toth L.S., Tsuji N., Valiev R.Z., Wilde G., Zehetbauer M.J., Zhu X. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances // *Materials Research Letters*. – 2022. – Vol. 10(4). – P. 163–256.

2 Segal V. Review: Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD) // *Materials*. – 2018. – Vol. 11. – P. 1175.

3 Abishkenov M., Ashkeyev Z., Nogaev K. Investigation of the shape rolling process implementing intense shear strains in special diamond passes // *Materialia*. – 2022. – Vol. 26. – P. 101573.

4 Ashkeyev Z., Abishkenov M., Mashekov S., Kawalek A. Stress state and power parameters during pulling workpieces through a special die with an inclined working surface // *Engineering Solid Mechanics*. – 2021. – Vol. 9(2). – P. 161–176.

5 Abishkenov M., Ashkeyev Z., Nogaev K., Bestembek Y., Azimbayev K., Tavshanov I. On the possibility of implementing a simple shear in the cross-section of metal materials during caliber rolling // *Engineering Solid Mechanics*. – 2023. – Vol. 11(3). – P. 253–262.

6 Obiko J.O., Mwema F.M., Bodunrin M.O. Finite element simulation of X20CrMoV121 steel billet forging process using the Deform 3D software // *SN Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 1. – P. 1044.

7 Berczki P., Szombathelyi V., Krállics G. Determination of flow curve at large cyclic plastic strain by multiaxial forging on MaxStrain System // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2014. – Vol. 84. – P. 182–188.

8 Berczki P., Krállics G., Renkó J. The effect of strain rate under multiple forging on the mechanical and microstructural properties // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 37. – P. 253–260.

9 Moon Y.H., Van Tyne C.J. Validation via FEM and plasticine modeling of upper bound criteria of a process-induced side-surface defect in forgings // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – Vol. 99(1–3). – P. 185–196.

10 Zhou W., Shi Z., Lin J., Dean T.A. An upper bound solution for deformation field analysis in differential velocity sideways extrusion using a unified stream function // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2022. – Vol. 224. – P. 107323.

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

11 Hsiang S.-H., Lin S.-L. Application of 3D FEM-slab method to shape rolling // International Journal of Mechanical Sciences. – 2001. – Vol. 43(5). – P. 1155–1177.

12 Liu Y., Li F., Jiang H.W. Microstructural analysis and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy prepared by alternate extrusion (AE) // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 92. – P. 4293–4301.

13 Kulagin R., Beygelzimer Y., Ivanisenko Yu., Mazilkin A., Straumal B., Hahn H. Instabilities of interfaces between dissimilar metals induced by high pressure torsion // Materials Letters. – 2018. – Vol. 222. – P. 172–175.

14 Beygelzimer Y., Varyukhin V., Synkov S., Orlov D. Useful properties of twist extrusion // Materials Science and Engineering: A. – 2009. – Vol. 503(1–2). – P. 14–17.

15 Beygelzimer Y., Reshetov A., Synkov S., Prokof'eva O., Kulagin R. Kinematics of metal flow during twist extrusion investigated with a new experimental method // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209(7). – P. 3650–3656.

16 Shahbaz M., Pardis N., Ebrahimi R., Talebanpour B. A novel single pass severe plastic deformation technique: Vortex extrusion // Materials Science and Engineering: A. – 2011. – Vol. 530. – P. 469–472.

М.Ж.Абишкенов, Е.С.Бестембек, С.Кулидан

Исследование характеристик потоков материала в процессе циклической закрытой штамповки методом численного моделирования

Одной из целей в области технологийковки и штамповки является упрощение процесса и разработка таких технологий, которые после завершения цикла деформации позволяют сохранять размеры и форму заготовки, соответствующие исходным или максимально приближенные к ним. С учётом последних достижений в разработке таких процессов, в данной статье предпринята попытка создания конструкции оборудования, обеспечивающего переменное циклическое нагружение, и предложен метод циклической закрытой штамповки (ЦЗШ). Для предварительной оценки метода ЦЗШ и исследования пластического течения алюминиевого сплава 6061-T4 при ЦЗШ проведено численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) с использованием коммерческой FEM-программы DEFORM-3D. Основное внимание уделено характеристикам течения металла. Моделирование показало, что при ЦЗШ в металле возникают диагональные и вихреобразные потоки, а характер течения является неравномерным.

Ключевые слова: метод конечных элементов (FEM), метод циклической закрытой штамповки (ЦЗШ), потоки металла, алюминиевый сплав 6061-T4, DEFORM-3D.

M.Abishkenov, Ye.Bestembek, S.Kulidan

Numerical simulation of material flow in the cyclic closed-die forging process

One of the objectives in forging and stamping technologies is to simplify the process and develop technologies that allow the workpiece to retain its initial or nearly initial dimensions and shape after the deformation cycle is completed. Considering the recent advancements in the development of such processes, this article presents an attempt to design equipment capable of providing variable cyclic loading and proposes a cyclic closed-die forging (CCDF) method. To conduct a preliminary evaluation of the CCDF method and to investigate the plastic flow of 6061-T4 aluminum alloy during CCDF, numerical modeling was carried out using the finite element method (FEM) in the commercial FEM software DEFORM-3D. The main focus was on the characteristics of the metal flow. The simulation revealed the presence of diagonal and vortex-like flows in the metal during CCDF, with the flow pattern being non-uniform.

Раздел 2. «Машиностроение, технологические машины и транспорт, строительство»

Keywords: finite element method (FEM), cyclic closed-die forging (CCDF) method, metal flow, 6061-T4 aluminum alloy, DEFORM-3D.

References

- 1 Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V.A., Beygelzimer Y., Blank V.D., Botta W.J., Bryła K., Čížek J., Divinski S., Enikeev N.A., Estrin Y., Faraji G., Figueiredo R.B., Fuji M., Furuta T., Grosdidier T., Gubicza J., Hohenwarter A., Horita Z., Huot J., Ikoma Y., Janeček M., Kawasaki M., Král P., Kuramoto S., Langdon T.G., Leiva D.R., Levitas V.I., Mazilkin A., Mito M., Miyamoto H., Nishizaki T., Pippan R., Popov V.V., Popova E.N., Purcek G., Renk O., Révész Á., Sauvage X., Sklenicka V., Skrotzki W., Straumal B.B., Suwas S., Toth L.S., Tsuji N., Valiev R.Z., Wilde G., Zehetbauer M.J., Zhu X. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances // *Materials Research Letters*. – 2022. – Vol. 10(4). – P. 163–256.
- 2 Segal V. Review: Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD) // *Materials*. – 2018. – Vol. 11. – P. 1175.
- 3 Abishkenov M., Ashkeyev Z., Nogaev K. Investigation of the shape rolling process implementing intense shear strains in special diamond passes // *Materialia*. – 2022. – Vol. 26. – P. 101573.
- 4 Ashkeyev Z., Abishkenov M., Mashekov S., Kawalek A. Stress state and power parameters during pulling workpieces through a special die with an inclined working surface // *Engineering Solid Mechanics*. – 2021. – Vol. 9(2). – P. 161–176.
- 5 Abishkenov M., Ashkeyev Z., Nogaev K., Bestembek Y., Azimbayev K., Tavshanov I. On the possibility of implementing a simple shear in the cross-section of metal materials during caliber rolling // *Engineering Solid Mechanics*. – 2023. – Vol. 11(3). – P. 253–262.
- 6 Obiko J.O., Mwema F.M., Bodunrin M.O. Finite element simulation of X20CrMoV121 steel billet forging process using the Deform 3D software // *SN Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 1. – P. 1044.
- 7 Berezki P., Szombathelyi V., Krállics G. Determination of flow curve at large cyclic plastic strain by multiaxial forging on MaxStrain System // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2014. – Vol. 84. – P. 182–188.
- 8 Berezki P., Krállics G., Renkó J. The effect of strain rate under multiple forging on the mechanical and microstructural properties // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 37. – P. 253–260.
- 9 Moon Y.H., Van Tyne C.J. Validation via FEM and plasticine modeling of upper bound criteria of a process-induced side-surface defect in forgings // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. – Vol. 99(1–3). – P. 185–196.
- 10 Zhou W., Shi Z., Lin J., Dean T.A. An upper bound solution for deformation field analysis in differential velocity sideways extrusion using a unified stream function // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2022. – Vol. 224. – P. 107323.
- 11 Hsiang S.-H., Lin S.-L. Application of 3D FEM-slab method to shape rolling // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2001. – Vol. 43(5). – P. 1155–1177.
- 12 Liu Y., Li F., Jiang H.W. Microstructural analysis and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy prepared by alternate extrusion (AE) // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 92. – P. 4293–4301.
- 13 Kulagin R., Beygelzimer Y., Ivanisenko Yu., Mazilkin A., Straumal B., Hahn H. Instabilities of interfaces between dissimilar metals induced by high pressure torsion // *Materials Letters*. – 2018. – Vol. 222. – P. 172–175.
- 14 Beygelzimer Y., Varyukhin V., Synkov S., Orlov D. Useful properties of twist extrusion // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – Vol. 503(1–2). – P. 14–17.
- 15 Beygelzimer Y., Reshetov A., Synkov S., Prokof'eva O., Kulagin R. Kinematics of metal flow during twist extrusion investigated with a new experimental method // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209(7). – P. 3650–3656.
- 16 Shahbaz M., Pardis N., Ebrahimi R., Talebanpour B. A novel single pass severe plastic deformation technique: Vortex extrusion // *Materials Science and Engineering: A*. – 2011. – Vol. 530. – P. 469–472.