

Раздел 5. «Химия»

МРНТИ 55.16.24

Е.А. Панин, А.Б. Есболат, Г.Е. Ахметова, И.Е. Волокитина, А.В. Волокитин, А.Е. Ибраева

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

«ТАБП-Лайнекс» бірлескен тәсілімен деформациялау кезінде КДК және микроқұрылым эволюциясын модельдеу

Бұл мақалада «ТАБП-Лайнекс» үрдісін соңғы-элементтік модельдеу жүргізілді. Металды өңдеу тиімділігін талдау үшін кернеулі деформацияланған күйдің негізгі параметрлері қарастырылды: эквивалентті деформация, эквивалентті кернеу және орташа гидростатикалық қысым және микроқұрылым эволюциясы. Бұл деформация схемасында дайындама деформацияның кезекті өсуін үш кезеңде алатындығы анықталды: шкивтермен қысу кезінде және матрицада екі түйістен өту кезінде. Кернеу күйін талдау кезінде дайындаманың барлық дерлік көлемі сығушы күйінде екендігі анықталды. Микроқұрылымның эволюциясы осы біріктірілген әдіспен деформацияның үш циклынан кейін ультраұсақтүйіршікті құрылымды алуға болатындығын көрсетті. Түйіршіктердің пішінінің дайындаманың қалыңдығы бойынша айырмашылығы құрылымның градиенттік факторын көрсетеді.

Түйін сөздер: біріктірілген үрдіс, қарқынды пластикалық деформация, теңарналы бұрыштық престеу, модельдеу, кернеулі деформацияланған күй, микроқұрылым.

Kipicne

Соңғы үш онжылдықта ультраұсақтүйіршікті құрылымды дайындамаларды алу үшін металдарды қысыммен өңдеудің көптеген әдістері жасалды және зерттелді. Бұл әдістер әртүрлі ығысу немесе таңбауыспалы деформация схемаларына негізделген. Ығыспалы және таңбауыспалы деформациялардың бір уақытта тіркесімі болып табылатын үрдістер жеке категория болып табылады. Барлық осы үрдістер «қарқынды пластикалық деформация» деп аталатын қысымды өңдеудің ерекше түрін жүзеге асыруға мүмкіндік береді.

Жоғары қысымды бұралу - көлемді ультраұсақтүйіршікті және наноқұрылымды үлгілерді алудың ең көне әдістерінің бірі [1-3]. Осы әдіспен алынған үлгілер диск тәрізді. Үлгі пуансон мен қозғалмайтын блок арасында қысылады және бірнеше ГПа қысыммен қысылады. Әр түрлі материалдарда жоғары қысымды бұралу әдісін қолдана отырып, түйіршік мөлшері 20 нм-ге дейінгі құрылымды алуға болады. Дегенмен, өнеркәсіптік әдіс ретінде жоғары қысымды бұралуды пайдалану перспективалары өңделетін бөліктердің шағын өлшемдеріне және жоғары жүктемелерге байланысты құралдың төмен төзімділігіне байланысты айтарлықтай кемшіліктерге ие.

Тең арналы бұрыштық престеу (ТАБП) әдісі осы кемшіліктердің көпшілігінен айырылған және 100-200 нм түйіршік өлшемі бар біртекті ультраұсақтүйіршікті құрылымы бар төртбұрышты немесе тікбұрышты көлденең қиманың үлгілерін алуға мүмкіндік береді және күрделі жабдықты қажет етпейді. Бұл әдіс дайындаманы матрицаның бұрыштық арнасы арқылы итеруден тұрады және ығысу схемасын жүзеге асырады. ТАБП технологиясы және оның әртүрлі вариациялары [4-7] жұмыстарда қарастырылады.

Шағын дайындамаларды алуға мүмкіндік беретін ҚПД үрдістерінен басқа, жаппай дайындамаларды өңдеуге мүмкіндік беретін қарқынды пластикалық деформация үрдістері белсенді дамып келеді. Бұл әдістер соғу үрдістеріндегі ығысу және таңбауыспалы деформацияларды күшейтуге негізделген [8-9]. Нәтижесінде құйма түріндегі бастапқы дайындамалар өңдеудің жоғары деңгейіне ие болады, бұл түйіршіктің көлденең қимасы бойынша қарқынды ұсақталуына әкеледі. Ал қарқынды ығысу деформациясы арқылы деформацияланатын құралдың жаңа конструкцияларын пайдалану

Раздел 5. «Химия»

классикалық жалпақ тоқпақтарды пайдаланумен салыстырғанда қуат тұтынуды азайтуға мүмкіндік береді.

Әдістер мен материалдар

Бұл жұмыстың мақсаты «ТАБП-Лайнекс» әдісімен деформациялау кезінде АД31 алюминий қорытпасының кернеулі деформацияланған күйін (КДК) және микроқұрылымының эволюциясын зерттеу болды. Зерттелетін «ТАБП-Лайнекс» үрдісінің моделін жасау үшін геометриялық және технологиялық параметрлер пайдаланылды: $R=50$ мм, $b_1=10$ мм, $h_1=10$ мм, $\Delta h=3$ мм, $\mu_1=0,7$, $\mu_2=0,05$, $l_1=30$ мм, $l_2=20$ мм, $l_3=15$ мм. Матрицадағы арналардың түйісу бұрышының мәні 140° таңдалды. Бөлме температурасындағы АД31 алюминий қорытпасының реологиялық қасиеттері ең жақын аналогы үшін Deform материалдар базасынан алынды (6063 қорытпасы).

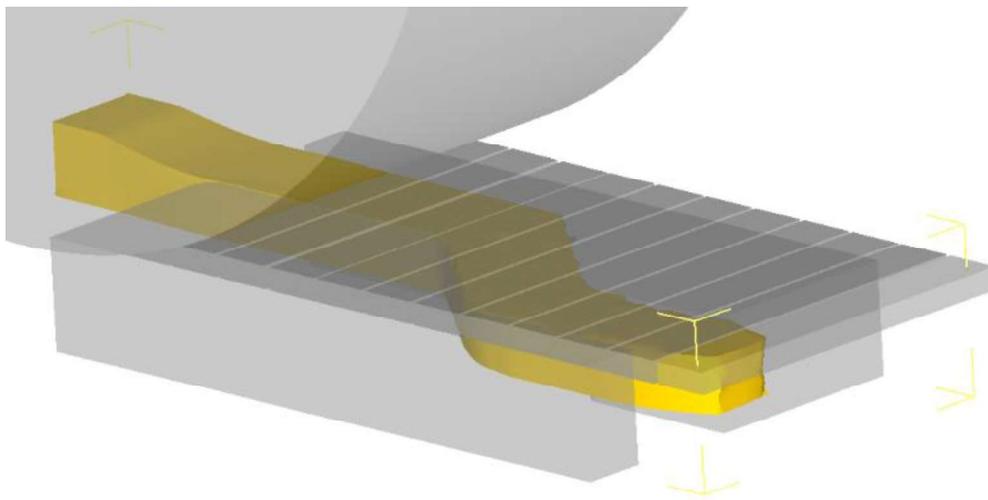
Осы үрдістің СЭӘ моделін құру кезінде деформацияланатын элементтердің жылдамдық параметрлерін дұрыс орнату қажет. Көлденең сызығы шкив радиусының төменгі нүктесінің деңгейіне сәйкес келетін матрица элементтерінің жоғарғы бетінде бірлік буындар кезекті түрде жасалады (буындардың ұзындығы аз болуы керек, шкивтің берілген радиусын 50 мм ескере отырып, олардың ұзындығы 5 мм қабылданды). Буындарға радиусы 50 мм-ге тең және шкивтердің айналу жиілігі 15 айн/мин (1,57 рад/с) ескеріле отырып, қозғалыстың сызықтық жылдамдығы беріледі, буындардың сызықтық жылдамдығы 78,5 мм/с-қа тең болады.

Үйкеліс коэффициентінің келесі мәндері анықталды:

- 0,08 дайындаманың матрица сегменттерімен жанасуында, майлау арқылы жылтыратылған бетке арналған Deform жүйесінің ұсынылған мәні ретінде;

- 0,7 дайындаманың шығырлар мен тізбекті элементтердің буындарының бетімен байланысында, жасанды түрде кесілген бет үшін Deform жүйесі ұсынған мән ретінде. Бұл тұжырымдама үйкелістің табиғи деңгейін едәуір арттыратын арнайы құрылым қолданылатын бетті білдіреді.

Есептеу жылдамдығын арттыру үшін көлденең симметрияны қолдану туралы шешім қабылданды, яғни дайындаманың $\frac{1}{2}$ қалыңдығы модельденген. Осы шартқа сәйкес бастапқы дайындаманың ені 9 мм, биіктігі 6,5 мм және ұзындығы 75 мм болды. Дайындаманың бүкіл көлемі 45000 соңғы элементтерге бөлінді, олардың көлемдік айырмашылық коэффициенті 3, яғни көлемі бойынша ең үлкен элемент ең кішкентайынан 3 есе үлкен болды.



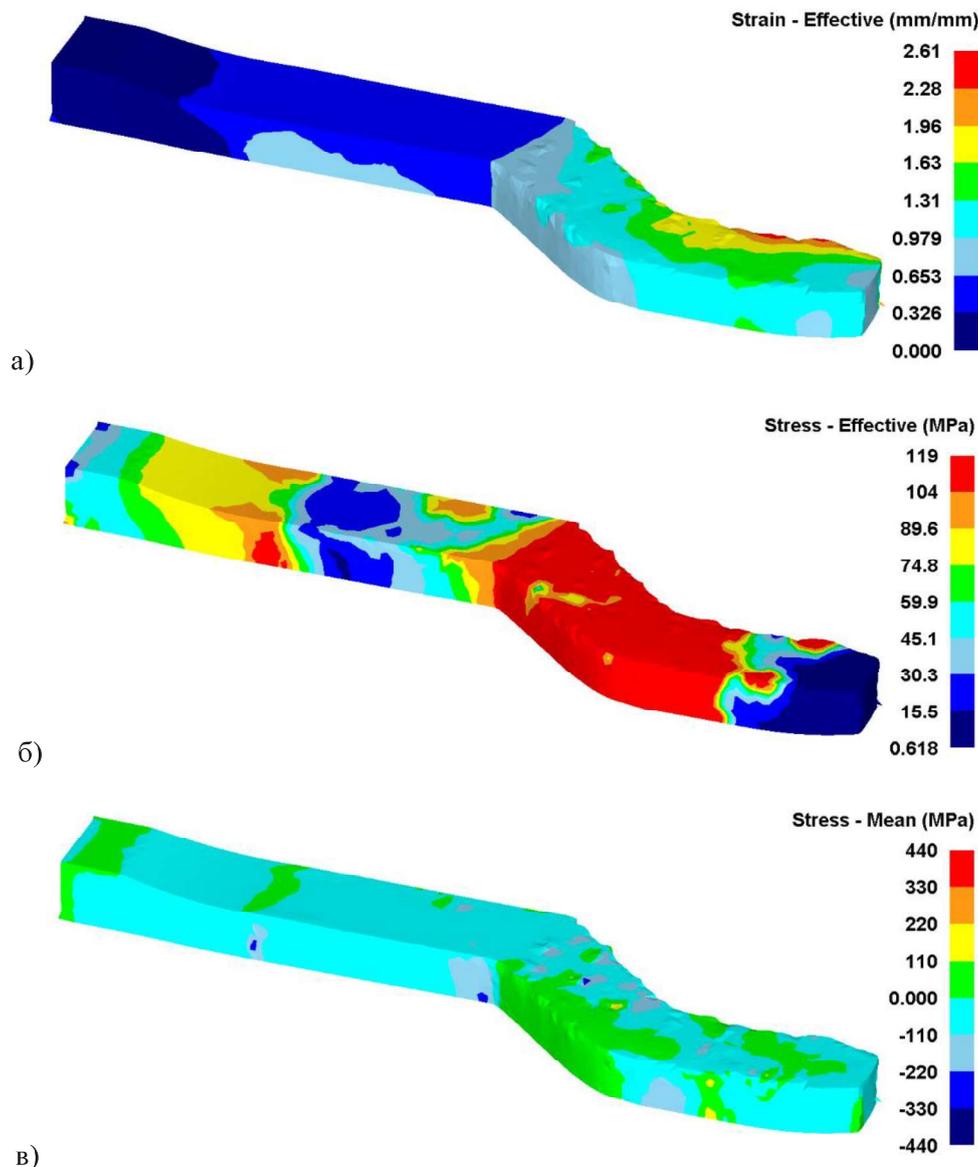
1 сурет. Соңғы сатыдағы есептелген модель

Талдауды бастамас бұрын, КДК параметрлерін зерттеу жүргізілетін үрдістің кезеңін анықтау қажет. Ең ұтымды шешім матрицаның кері қысымының максималды мәндері пайда болатын кезең болады. Бұл барлық параметрлердің сандық мәндерін ғана емес, сонымен қатар осы жағдайларда деформация үрдісінің мүмкіндігін бағалауға мүмкіндік береді. Сондықтан талдау үшін деформацияның соңғы сатысы таңдалды, онда дайындама матрицаның барлық үш арнасында, алдыңғы ұшымен одан шығады.

Раздел 5. «Химия»

Нәтижелер және талқылау

ҚДК параметрлерін бөлудің келесі суреттері алынды (2 сурет). Эквивалентті деформацияны қарастыра отырып, осы деформация схемасымен дайындама деформацияның өсуін үш кезеңде алады: шкивтермен қысу кезінде және матрицада екі буыннан өту кезінде. Эквивалентті кернеудің таралуын талдау кезінде бұл процесс тұрақты жүре алмайтындай әсер қалдыруы мүмкін, өйткені матрицадағы кернеу деңгейі оның мәндері бойынша және шкивтердің деформация ошағындағы кернеулерден асып түседі. Алайда, бұл жерде кернеу деректері әрекет ететін көлденең қиманың ауданын ескеру қажет – шкивтердің деформация ошағында ол 17% - ға артық. Сондықтан мұнда матрицаның кері қысымынан асатын күш деңгейі жасалады. Орташа гидростатикалық қысымды талдау кезінде шкаланы нөлдік белгі болатындай етіп қою керек. Бұл созылу және сығу аймақтарын түс схемасы бойынша бөлуді жеңілдетеді. 2в суреттен дайындаманың барлық дерлік көлемі сығу күйінде екенін атап өтуге болады. Сыртқы көлбеу бетте жеке созылу аймағы пайда болады, бұл дайындаманы матрицадан сілтемелермен тартудың нәтижесі. Дәл осы фактор екінші буынның металмен толық толтырылмауына әкеледі.



2 сурет. «ТАБП-Лайнекс» үрдісі барысында кернеулі-деформацияланған жағдайдың параметрлері: а-эквивалентті деформация; б-эквивалентті кернеу; в-орташа гидростатикалық қысым

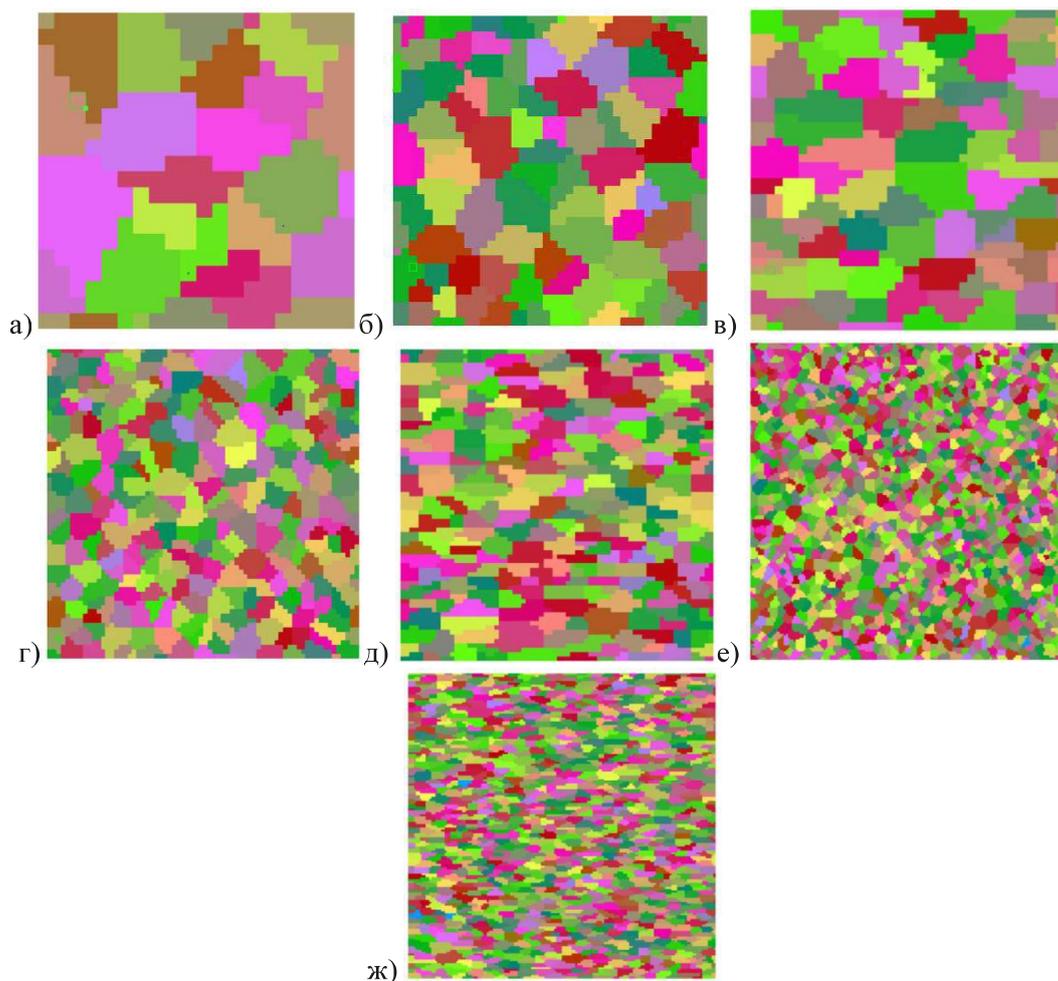
Микроқұрылымның эволюциясын зерттеуді екі нүктеде де (орталықта және бетінде) жүргізу туралы шешім қабылданды. Бұл жағдайда ең тиімді әдіс микроқұрылымды клетті автоматтар (Cellular

Раздел 5. «Химия»

Automata немесе СА) әдісімен модельдеу болады. Бұл алгоритмнің басты ерекшелігі-түйіршіктердің өлшемін ғана емес, олардың пішінін де болжау мүмкіндігі. Клетті автоматтарды пайдалану кезіндегі есептеу механизмінің егжей-тегжейлі сипаттамасы [10-11] жұмыстарында келтірілген.

Есептеу үшін бастапқы деректер ретінде бұл алгоритм бастапқы орташа түйіршік өлшемін пайдаланады. Сонымен қатар, модельдің бірнеше коэффициенттері енгізілуі керек, олардың мәндері өңделетін материалдың сипатына байланысты. [12] жұмыста СА моделінің бірқатар коэффициенттері, соның ішінде алюминий қорытпалары ұсынылған.

3 суретте бастапқы құрылым және зерттелетін екі аймақта бір деформация циклінен кейін көрсетілген. Түйіршіктің бастапқы өлшемі ретінде 20 мкм мәні қабылданды. Құрылымды көрсету үшін есептеу кезінде 50 x 50 мкм терезе параметрлері орнатылды.



3 сурет. Көп өтулі модельдеудегі құрылым: а – бастапқы; б – 1інші цикл, центр; в – 1інші цикл, беттік; г – 2нші цикл, центр; д – 2нші цикл, поверхность; е – 3інші цикл, центр; ж – 3інші цикл, поверхность

Бір деформация циклі жүргізілгеннен кейін, бастапқы түйіршік екі аймақта да 6-7 мкм-ге дейін ұсақталатыны анықталды. Алайда, түйіршіктің бойлық бағытта аздап тартылуы беттік қабатында тіркелді. Бұл илектеу кезеңінің де нәтижесі (мұнда сығумен қатар, дайындама айтарлықтай созылу деңгейін алады) және матрицадағы престеу кезеңдері, мұнда беткі қабаттар конвейердің буындарымен байланыстың жоғарылауы арқылы белгілі бір созу деңгейін алады. Екінші және үшінші циклдарда дайындама 1,5 мм сығудың төмен деңгейіне ие болды, бұл жеткілікті болды, өйткені бастапқыда каналдардың түйісу бұрышы жоғарылаған және нәтижесінде кері қысым деңгейі төмендеген матрица қолданылған. Деформацияның екінші циклынан кейін құрылым екі аймақта 2-3 мкм-ге дейін ұсақталады. Беттік қабатта түйіршіктерді тарту деңгейі айқынырақ болады. Үшінші деформация циклынан кейін құрылым екі аймақта да 1 мкм-ге дейін ұсақталады, жеке түйіршіктердің мөлшері 0,8-0,9 мкм құрайды. Түйіршіктердің бетінде олар өте ұзартылады.

Раздел 5. «Химия»*Қорытынды*

Көпөтулі модельдеу нәтижесінде «ТАБП-Лайнекс» деформациясының біріктірілген әдісін қолдана отырып, кем дегенде үш деформация циклынан кейін ультраұсақтүйіршікті құрылымды алуға болатындығы анықталды. Түйіршіктердің пішінінің дайындаманың қалыңдығы бойынша айырмашылығы құрылымның градиенттік факторын көрсетеді.

Алғыс

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің Ғылым комитетімен қаржыландырылды (Грант № AP13067723).

Әдебиеттер тізімі

1. Jahedi, M. High-Pressure Double Torsion as a Severe Plastic Deformation Process: Experimental Procedure and Finite Element Modeling [Text] / M. Jahedi, M. Knezevic, M.H. Paydar // J. Mater. Eng. Perform. – 2015. - Vol. 24. - P. 1471-1482.
2. Straska, J. Evolution of microstructure and hardness in AZ31 alloy processed by high pressure torsion [Text] / J. Straska, M. Janecek, J. Gubicza, T. Krajnak, E.Y. Yoon, H.S. Kim // Mater. Sci. Eng. A. – 2015. - Vol. 625. – P. 98-106.
3. Alhamidi, A. Grain refinement and high strain rate superplasticity in aluminium 2024 alloy processed by high-pressure torsion [Text] / A. Alhamidi, Z. Horita // Mater. Sci. Eng. A. – 2015. - Vol. 622. – P. 139-145.
4. Shaeri, M.H. Microstructure and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing combined with aging treatment [Text] / M.H. Shaeri, M.T. Salehi, S.H. Seyyedein, M.R. Abutalebi, J.K. Park // Mater. Des. – 2014. - Vol. 57. – P. 250-257.
5. Zhang, X. Effect of route on tensile anisotropy in equal channel angular pressing [Text] / X. Zhang, X. Liu, J. Wang, Y. Cheng // Mater. Sci. Eng. A. – 2016. - Vol. 676. – P. 65-72.
6. Wei, W. Microstructure and tensile properties of Cu-Al alloys processed by ECAP and rolling at cryogenic temperature [Text] / W. Wei, S.L. Wang, K.X. Wei, I.V. Alexandrov, Q.B. Du, J. Hu // J. Alloys Compd. – 2016. - Vol. 678. – P. 506-510.
7. Mostaed, E. Microstructural, texture, plastic anisotropy and superplasticity development of ZK60 alloy during equal channel angular extrusion processing [Text] / E. Mostaed, A. Fabrizi, F. Bonollo, M. Vedani // Metall. Ital. – 2015. - Vol. 11-12. – P. 5-12.
8. Markov, O.E. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation [Text] / O.E. Markov, A.V. Perig, M.A. Markova, V.N. Zlygoriev // Int. J. Adv. Manuf. Tech. – 2016. - Vol. 83. – P. 2159-2174.
9. Kukhar, V. The selection of options for closed-die forging of complex parts using computer simulation by the criteria of material savings and minimum forging force [Text] / V. Kukhar, E. Balalayeva, S. Hurkovska, Y. Sahirov, O. Markov, A. Prysiaznyi, O. Anishchenko // Adv. Intell. Syst. Comput. – 2020. - Vol. 989. – P. 325-331.
10. Hesselbarth, H.W. Simulation of Recrystallization by Cellular Automata [Text] / H.W. Hesselbarth // Acta Metallurgica et Materialia. – 1991. - Vol. 39. – P. 2135-2143.
11. Volokitina, I. FEM-study of bimetallic wire deformation during combined ECAP-drawing [Text] / I. Volokitina., A. Volokitin, A. Naizabekov, E. Panin // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2021. - Vol. 56. – P. 410-416.
12. DEFORM v12.1. System Documentation. SFTC, 2021 - 6130 p.

Раздел 5. «Химия»

Панин Е.А., Есболат А.Б., Ахметова Г.Е., Волокитина И.Е., Волокитин А.В.,
Ибраева А.Е.

Моделирование НДС и эволюции микроструктуры при деформировании совмещенным способом «РКУП-Лайнекс»

В данной статье было проведено конечно-элементное моделирование процесса «РКУП-Лайнекс». Для анализа эффективности проработки металла были рассмотрены основные параметры напряженно-деформированного состояния: эквивалентная деформация, эквивалентное напряжение и среднее гидростатическое давление, а также эволюция микроструктуры. Было установлено, что при данной схеме деформирования заготовка получает последовательный прирост деформации в три этапа: при обжатии шкивами и при прохождении двух стыков в матрице. При анализе напряженного состояния выявлено, что почти весь объем заготовки находится в состоянии сжатия. Эволюция микроструктуры показала, что данным совмещенным способом можно добиться получения ультрамелкозернистой структуры после трех циклов деформирования. Различие формы зерен по толщине заготовки говорит о факторе градиентности структуры.

Ключевые слова: совмещенный процесс, интенсивная пластическая деформация, равноканальное угловое прессование, моделирование, напряженно-деформированное состояние, микроструктура.

Panin E.A. Esbolat A.B., Akhmetova G.E., Volokitina I.E., Volokitin A.V. Ibraeva A.E.

Modeling of SSS and microstructure evolution during deformation by combined method “ECAP-Linex”

In this article, finite element modeling of ECAP-Linex process was carried out. To analyze the efficiency of metal processing, the main parameters of the stress-strain state were considered: equivalent strain, equivalent stress and average hydrostatic pressure, as well as the microstructure evolution. It was found that with this deformation scheme, the workpiece receives a sequential increase in strain in three stages: when compressed by pulleys and when passing two joints in the matrix. When analyzing the stress state, it was revealed that almost the entire volume of the workpiece is in a state of compression. The microstructure evolution has shown that this combined method can be used to obtain an ultrafine-grained structure after three deformation cycles. The difference in the shape of the grains in the thickness of the workpiece indicates the gradient factor of the structure.

Keywords: combined process, severe plastic deformation, equal-channel angular pressing, modeling, stress-strain state, microstructure.

List of references

1. Jahedi, M. High-Pressure Double Torsion as a Severe Plastic Deformation Process: Experimental Procedure and Finite Element Modeling [Text] / M. Jahedi, M. Knezevic, M.H. Paydar // J. Mater. Eng. Perform. – 2015. - Vol. 24. - P. 1471-1482.
2. Straska, J. Evolution of microstructure and hardness in AZ31 alloy processed by high pressure torsion [Text] / J. Straska, M. Janecek, J. Gubicza, T. Krajnak, E.Y. Yoon, H.S. Kim // Mater. Sci. Eng. A. – 2015. - Vol. 625. – P. 98-106.

Раздел 5. «Химия»

3. Alhamidi, A. Grain refinement and high strain rate superplasticity in aluminium 2024 alloy processed by high-pressure torsion [Text] / A. Alhamidi, Z. Horita // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2015. - Vol. 622. – P. 139-145.
4. Shaeri, M.H. Microstructure and mechanical properties of Al-7075 alloy processed by equal channel angular pressing combined with aging treatment [Text] / M.H. Shaeri, M.T. Salehi, S.H. Seyyedain, M.R. Abutalebi, J.K. Park // *Mater. Des.* – 2014. - Vol. 57. – P. 250-257.
5. Zhang, X. Effect of route on tensile anisotropy in equal channel angular pressing [Text] / X. Zhang, X. Liu, J. Wang, Y. Cheng // *Mater. Sci. Eng. A.* – 2016. - Vol. 676. – P. 65-72.
6. Wei, W. Microstructure and tensile properties of Cu-Al alloys processed by ECAP and rolling at cryogenic temperature [Text] / W. Wei, S.L. Wang, K.X. Wei, I.V. Alexandrov, Q.B. Du, J. Hu // *J. Alloys Compd.* – 2016. - Vol. 678. – P. 506-510.
7. Mostaed, E. Microstructural, texture, plastic anisotropy and superplasticity development of ZK60 alloy during equal channel angular extrusion processing [Text] / E. Mostaed, A. Fabrizi, F. Bonollo, M. Vedani // *Metall. Ital.* – 2015. - Vol. 11-12. – P. 5-12.
8. Markov, O.E. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation [Text] / O.E. Markov, A.V. Perig, M.A. Markova, V.N. Zlygoriev // *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* – 2016. - Vol. 83. – P. 2159-2174.
9. Kukhar, V. The selection of options for closed-die forging of complex parts using computer simulation by the criteria of material savings and minimum forging force [Text] / V. Kukhar, E. Balalayeva, S. Hurkovska, Y. Sahirov, O. Markov, A. Prysiashnyi, O. Anishchenko // *Adv. Intell. Syst. Comput.* – 2020. - Vol. 989. – P. 325-331.
10. Hesselbarth, H.W. Simulation of Recrystallization by Cellular Automata [Text] / H.W. Hesselbarth // *Acta Metallurgica et Materialia.* – 1991. - Vol. 39. – P. 2135-2143.
11. Volokitina, I. FEM-study of bimetallic wire deformation during combined ECAP-drawing [Text] / I. Volokitina., A. Volokitin, A. Naizabekov, E. Panin // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy.* – 2021. - Vol. 56. – P. 410-416.
12. DEFORM v12.1. System Documentation. SFTC, 2021 - 6130 p.