

FTAMP 29.19.45
ЭОЖ 669.018.45[DOI 10.53002/091](https://doi.org/10.53002/091)

Абжанова Л. К.

*Ғ.Дәукеев атындағы Алматы Энергетикалық және Байланыс Университеті, Алматы.
Қазақстан
(E-mail: l.abzhanova@aues.kz)*

Рентген рентгеноскопиясы арқылы зерттелген металдың көбіктенуі

Металл көбік түзілуін және эволюциясын in-situ зерттеу үшін рентгендік рентгеноскопияны қолдану қарастырылады. Таңдалған нәтижелер металдың көбіктенуі үшін диагностикалық құрал ретінде рентгендік рентгеноскопияның күшін көрсетеді. Көбік нуклеациясының және эволюциясының, дренаждың дамуының, термиялық байланыс мәселелерінің, зеңді толтырудың, жасуша қабырғасының жарылуының және т.б. сапалы талдаулар берілген. Бұған қоса, біріктіру жылдамдығын, тығыздықты бөлуді және т.б. беретін көбік кеңеюінің суреттер сериясына негізделген сандық талдау арнайы бағдарламалық құрал арқылы орындалады. Бұл әдістер металдардың көбіктену әрекетін түсінуге және көбік беру әдістерін де, көбік сапасын да жақсартуға көмектеседі.

Түйін сөздер: металл көбік, рентген, рентгеноскопия, синхротрондық сәулелену.

Кіріспе.

Қатты металдан жасалған көбіктер әр түрлі қолдану үшін перспективалы материалдар болып табылады [1]. Олардың құрылымы барлық көбік сияқты күрделі болғандықтан, оларды зерттеу қиын [2]. Металл көбік түзілуін, эволюциясын және тұрақтануын түсіну үшін біз оларды сұйық күйде қатайғанға дейін және кату кезінде зерттеуіміз керек, өйткені бұл кезеңдегі процестер қатты көбіктің соңғы құрылымы мен қасиеттеріне анық әсер етеді.

Фотондарға немесе нейтрондарға негізделген радиографиялық бейнелеу әдістері үлгілердің ішкі құрылымын байқауға мүмкіндік береді [3]. Қолайлы уақыт рұқсатымен нақты уақыт режимінде жазылған рентгенографиялар сериясы рентгеноскопия деп аталады. Көбіктерде рентгеноскопия кеңею, макроскопиялық кеуектер құрылымының эволюциясы, тығыздықтың таралуы, бірігу оқиғалары және т.б. сияқты in-situ әртүрлі процестерді зерттеуге мүмкіндік береді. Біз рентгендік рентгеноскопияға назар аударамыз, өйткені бұл әдіс ең жақсы кеңістіктік және уақытша рұқсаттарды және металдық матрица мен газ-контраст арасындағы оңтайлы контрастты ұсынады. Біз 2000 жылы алғашқы хабарланған әрекеттерден бастап соңғы әзірлемелерге дейін металдың көбіктенуін бақылау үшін рентгендік бейнелеудің эволюциясын ұсынатын боламыз.

Методология.

Металл көбігінің түзілуі мен эволюциясын in-situ бақылау үшін рентгендік рентгеноскопия әдісі қолданылды. Зерттеу бірнеше кезеңнен тұрды.

Бірінші кезеңде тәжірибеге арналған металл преформалары дайындалды. Алдын ала белгілі құрамдас бөліктері бар ұнтақ немесе суспензия негізіндегі преформалар белгілі бір температуралық режимде көбіктенуге қабілетті болуы тиіс. Үлгілердің геометриясы, массасы және бастапқы тығыздығы кейінгі сандық талдау үшін тіркелді.

Екінші кезеңде рентгендік рентгеноскопияға арналған эксперименттік құрылым жинақталды. Үлгілер жоғары температуралы пешке немесе жергілікті қыздыру модуліне орналастырылып, синхротрондық рентгендік сәулемен қатарластыра бағытталды. Радиографиялық түсірілім үшін CMOS немесе sCMOS типті жылдам детекторлар, сондай-ақ LuAG:Ce немесе YAG:Ce сцинтилляторлары қолданылды. Эксперимент рентген сәулесінің энергиясын, кадр жиілігін және

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

көру өрісін оңтайландыру арқылы жүргізілді. Экспозиция уақыты процестің динамикасына байланысты 1 мкс–10 мс аралығында таңдалды.

Үшінші кезеңде нақты уақыт режимінде түсірілген рентгенографиялық бейнелер сериясы жинақталды. Бейнелерден көбік нуклеациясы, көпіршіктердің өсуі, бірігуі, дренаждың басталуы мен дамуы, жасуша қабырғаларының локалды бұзылуы сияқты құбылыстар тіркелді. Сонымен бірге көлемдік өзгерістер мен көбіктің кеңею кинетикасын көрсететін макропараметрлер бақыланды.

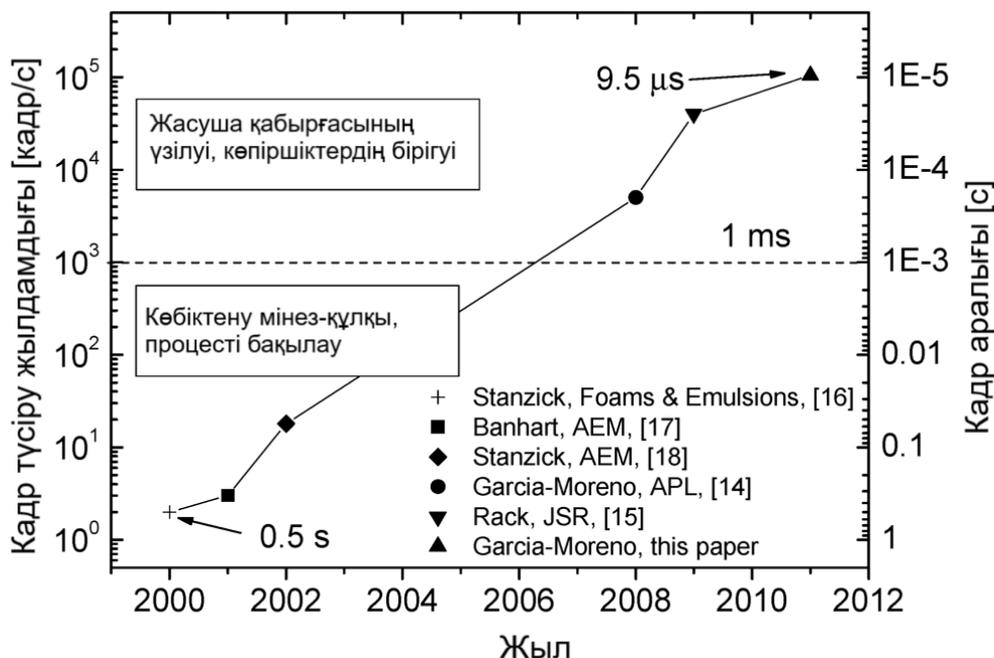
Төртінші кезеңде алынған деректер сандық өңдеуден өтті. Арнайы бағдарламалық қамтамасыз ету арқылы көпіршіктердің саны, олардың орташа диаметрі, көлемдік тығыздықтың таралуы, бірігу оқиғаларының жиілігі және кеңею жылдамдығы сияқты көрсеткіштер анықталды. Уақыт қатарлары негізінде процестердің кинетикалық сипаттамалары есептеліп, металл көбігінің қалыптасу механизмдері талданды.

Осы кешенді әдістеме рентгендік рентгеноскопияны металл көбіктерінің физика-химиялық эволюциясын түсіну үшін жоғары дәлдікті құрал ретінде пайдалануға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері.

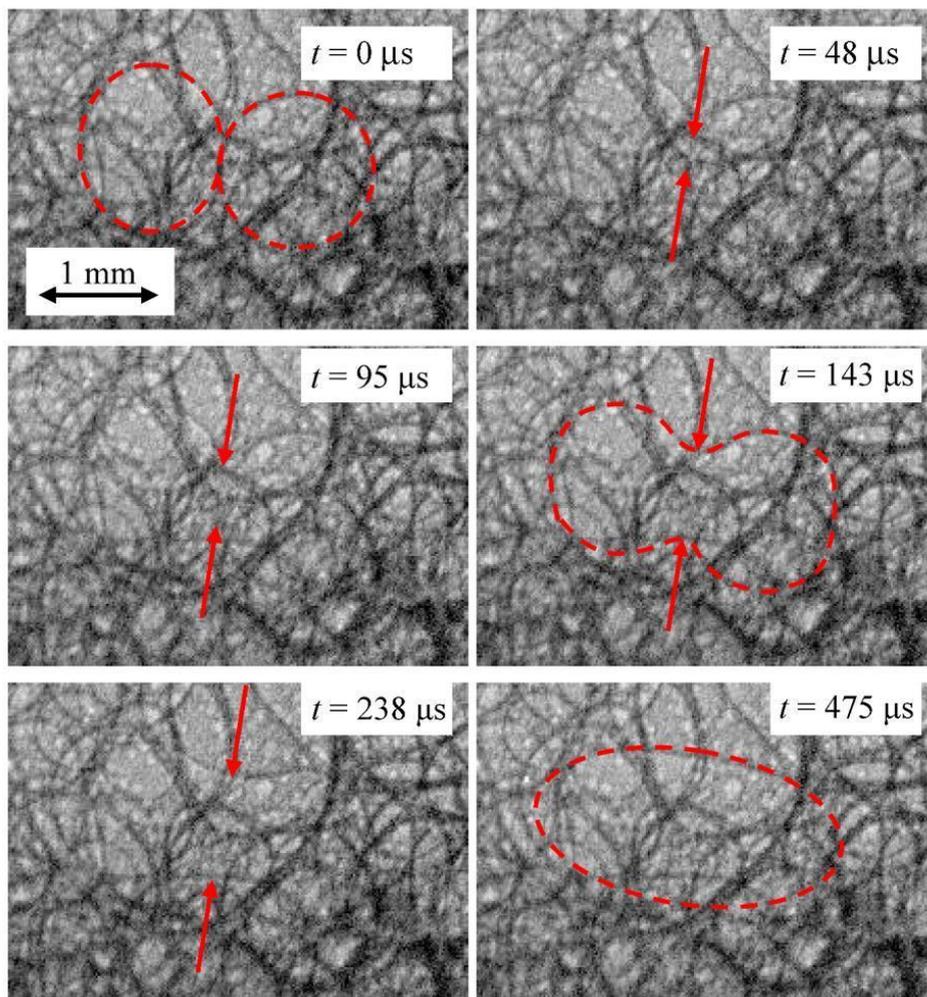
Үшінші буындағы синхротронды жарық көздері кеңістікте де, уақытта да микро-ашықтығы бар радиографияны орындау үшін жеткілікті жоғары полихроматикалық рентгендік фотон ағынының тығыздығын береді [12,13,14,15]. Бейнелеу аппаратурасының, әсіресе CMOS сенсорлары саласында қарқынды дамуы және олардың үздіксіз жетілдірілген сезімталдығы қазір айтарлықтай (кемінде 10×20 мм²) көру өрісі үшін экспозиция уақыты 1 мкс-қа дейін төмен түсіру жылдамдығымен ерекше жоғары жазуға мүмкіндік береді. Рентген сәулелерінің кірістірілген фазалық контрастын оңтайландырылған пайдалану (рентгендік синхротрондық сәуленің когеренттілік қасиеттеріне байланысты) біздің ұялы материалымыз үшін ең жақсы контрастты алуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, LuAG:Ce немесе YAG:Ce кристалдары сияқты радиациялық қатты, бірақ жоғары сезімтал және тиімді монокристалды сцинтилляторлар қолданылады. Бұл жалпы процесті қадағалауға және тері тесігінің ядролануы және өсуі, көбіктің кеңеюі немесе дренажы сияқты баяу процестерді ғана емес (>1 мс экспозиция уақыты) немесе жалпы көбіктену процесін бақылап қана қоймай, сонымен қатар жасуша қабырғасының жыртылуы, көпіршіктердің тез жиналуы немесе тез көпіршіктердің пайда болуы сияқты өте жылдам процестерді (≤ 1 мс экспозиция уақыты) шешуге мүмкіндік береді. 1-суретте әдебиетте [14,15,16,17,18] және соңғы нәтижелерде хабарланғандай, өткен жылдарда қол жеткізілген рентгендік синхротронды радиоскопияның уақыт ажыратымдылығының жақсаруы көрсетілген.

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»



Сурет 1. Металдың көбіктенуін визуализациялау үшін қолданылатын in-situ синхротронды рентгендік рентгеноскопияның уақыт ажыратымдылығының эволюциясы.

Сұйық көбіктердегі металл қабықшаларды немесе жасуша қабырғаларын тұрақтандыру металл көбік ғылымындағы негізгі мәселе болып табылады, бірақ әлі де толық түсінілмеген. Неғұрлым тұрақты пленкалар аз біріктіруді білдіреді, сондықтан біркелкі өлшемді үлестірумен кішірек көпіршіктер, бұл өте қажет. Жарылу сипатын зерттеу үшін бір уақытта жоғары кеңістіктік және жоғары уақыттық ажыратымдылыққа сұраныс болған эксперименттер жүргізілді. Әрбір кадр үшін 40 000 кадр/с және экспозиция уақыты 25 мкс болатын екі көршілес көпіршіктердің бірігуін байқауға болады [15]. Соңғы эксперименттер 9,5 мкс кадр аралығымен және 20 мкм тиімді пиксел өлшемімен 105 000 кадр/сек жазу жылдамдығымен жүргізілді. Қысқа экспозиция уақыты мен кескіндердің шектеулі динамикасына байланысты мұндай кескіндердің контрасты төмен болғанымен, 2-суретте екі көпіршіктің бірігуі ~475 мкс-те аяқталатыны және қабықтың жарылуы ~380 мкс-қа созылатыны анық көрінеді, егер үзілудің соңы оның түзу нүктесіне айналатын жердегі көпіршікті одан бұрынғы нүкте ретінде қарастырсақ, дөнес.

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

Сурет 2. In-situ жылдам синхротронды рентгендік радиоскопиялық талдаудан алынған AlSi10 + 0,5 масса% TiH₂ көбікінің 640 °C кезіндегі рентгенограммалар сериясы (Еуропалық синхротрондық сәулелену қондырғысының (ESRF) ID19 сәуле сызығында алынған деректер). 9,5 мкс кадр аралығымен (105 кф/с) өлшенген екі көпіршіктің бірігуін байқауға болады. Үзік сызықтар көпіршіктердің контурын көрсетеді, ал көрсеткілер сәйкес жасуша қабырғасының жарылғанын көрсетеді.

Бұл эксперименттерде қабықтың жарылу уақытында оның тұтқырлығы емес, сұйықтықтың инерциясы басым болатынын көрсетуге болады, өйткені жарылу өте жылдам болды [14]. Сондықтан, $\eta = 0,4$ Па·с (Gergely және т.б. [19] есептегендей) жоғары болатын тиімді тұтқырлық арқылы тұрақтандыру осы жерде зерттелген түрдегі металл көбіктеріне қолданылмайтынын көрсетуге болады. Көпіршік мөлшері мен қорытпаның құрамы сияқты басқа факторлар жарылу уақытына әсер етуі мүмкін және болашақта зерттелетін болады.

Қорытынды.

Рентген рентгеноскопиясы дамып келе жатқан металл көбіктерін жердегі зерттеудің қуатты құралы болып табылады. Синхротрондық және зертханалық қондырғылар көбік түзілуін жергілікті бақылауға мүмкіндік береді. 20 мкм-ге дейінгі тиімді пиксель өлшемімен жоғары кеңістіктік ажыратымдылық және қазіргі уақытта 10 мкс дейінгі ең жақсы қол жеткізуге болатын уақыт ажыратымдылығы жасуша қабырғасының жырттылуы мен көпіршікті бірігуін анықтауға және талдауға мүмкіндік береді. Көбіктің кеңеюін, пішінді толтыруды, дренажды және т.б. жерінде бақылауға болады. Газ атмосферасы мен қысымының әсерін зерттеу сыртқы көбік қабығы арқылы

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

газдың жоғалуына тотығудың әсерін көрсетуге мүмкіндік берді. Осындай тәжірибелерден алынған нәтижелер негізінде қысымның әсерінен көбік түзу немесе меншікті газ көзі бар көбік түзу сияқты жаңа көбік түзу процестері әзірленді. Кеңейту эволюциясы, тығыздық профильдері, біріктіру жылдамдығы, дренаж және т.б. тұрғысынан тек сапалық емес, сонымен қатар сандық кескін талдаулары орындалды. Алюминий көбікті сэндвич панельдеріндегі катаюдың кеңеюі және көпіршіктердің туралануы сияқты жаңа әсерлер табылды. Микрогравитациялық тәжірибелер микрогравитация жағдайында балқыманың көбікке сіңуін бақылау және сандық анықтау үшін рентгендік рентгеноскопияны қолданды және гравитацияның біріктіруге күтпеген әлсіз әсерін анықтады.

Әдебиеттер тізімі

1. Banhart, J. Металл көбіктері мен металдардың өндірісі, сипаттамасы және қолданылуы. *Prog. Mater. Sci.* 2001, 46, 559–632.
2. Banhart, J.; Weaire, D. Жолда қайта: Металл көбіктері танымал болуда. *Phys. Today* 2002, 55, 37–42.
3. Banhart, J.; Borbély, A.; Dzieciol, K.; García-Moreno, F.; Manke, I.; Kardjilov, N.; Kaysser-Pyzalla, A.R.; Strobl, M.; Treimer, W. Рентген және нейтрондық кескіндеу – материалтану және инженерияға арналған толықтырғыш әдістер. *Int. J. Mater. Res.* 2010, 101, 1069–1079.
4. Mathiesen, R.H.; Arnberg, L.; Ramsøskar, K.; Weitkamp, T.; Raur, C.; Snigirev, A. Алюминий қорытпаларының қату процесін рентген кескіндеу арқылы уақыт бойынша зерттеу. *Metall. Mater. Trans. B* 2002, 33, 613–623.
5. Buffet, A.; Reinhardt, G.; Schenk, T.; Nguyen-Thi, H.; Gastaldi, J.; Manginck-Noel, N.; Bergeon, N.; Jung, H.; Hartwig, J.; Baruchel, J. Алюминий негізіндегі қорытпалардың нақты уақыттағы және *in situ* қатуын синхротрондық сәулелену арқылы зерттеу: радиография мен топография әдістерін біріктіретін бірегей тәжірибелік жүйе. *Phys. Status Solidi A* 2007, 204, 2721–2727.
6. Arnberg, L.; Mathiesen, R.H. Алюминий қорытпаларының қату процесін нақты уақыт режимінде жоғары ажыратымдылықтағы рентгендік бейне микроскопиясы. *JOM J. Miner. Met. Mater. Soc.* 2007, 59, 20–26.
7. Nguyen-Thi, H.; Reinhardt, G.; Buffet, A.; Schenk, T.; Manginck-Noel, N.; Jung, H.; Bergeon, N.; Billia, B.; Hartwig, J.; Baruchel, J. TGZM құбылыстарын синхротрондық рентген радиографиясы арқылы *in situ* және нақты уақыттағы талдау. *J. Cryst. Growth* 2008, 310, 2906–2914.
8. Yasuda, H.; Yamamoto, Y.; Nakatsuka, N.; Yoshiya, M.; Nagira, T.; Sugiyama, A.; Ohnaka, I.; Uesugi, K.; Umetani, K. А-Cu және Fe-Si-Al қорытпаларының қату процесін *in situ* бақылау. *Int. J. Cast. Met. Res.* 2009, 22, 15–21.
9. Griesche, A.; Garcia-Moreno, F.; Macht, M.-P.; Froberg, G. AlNiCe-балқымаларында химиялық диффузия тәжірибелері. *Mater. Sci. Forum* 2006, 508, 567–572.
10. Zabler, S.; Rueda, A.; Rack, A.; Riesemeier, H.; Zaslansky, P.; Manke, I.; Garcia-Moreno, F.; Banhart, J. Түйіршіктері жетілдірілген жартылай қатты Al-Ge₃₂ қорытпасының іріленуі: рентген микротомографиясы және *in situ* радиография. *Acta Mater.* 2007, 55, 5045–5055.
11. Zabler, S.; Rack, A.; Rueda, A.; Helfen, L.; Garcia-Moreno, F.; Banhart, J. Синхротрондық рентген микрорадиоскопия арқылы жартылай қатты қорытпалардағы ағынды тікелей бақылау. *Phys. Status Solidi A* 2010, 207, 718–723.
12. Wang, Y.; Liu, X.; Im, K.S.; Lee, W.K.; Wang, J.; Fezzaa, K.; Hung, D.L.S.; Winkelmann, J.R. Құрылымды бақылау жылдамдығын пайдалана отырып, тығыз сұйық ағын динамикасын ультра жылдам рентген зерттеуі. *Nat. Phys.* 2008, 4, 305–309.
13. Rack, A.; Garcia-Moreno, F.; Schmitt, C.; Betz, O.; Cecilia, A.; Ershov, A.; Rack, T.; Banhart, J.; Zabler, S. Полихроматты синхротрондық сәулеленуді қолдана отырып, қатты рентген кескіндеудің жоғары кеңістіктік-уақыттық ажыратымдылық мүмкіндіктері. *J. X-ray Sci. Technol.* 2010, 18, 429–444.
14. Garcia-Moreno, F.; Rack, A.; Helfen, L.; Baumbach, T.; Zabler, S.; Babcsán, N.; Banhart, J.; Martin, T.; Ponchut, C.; di Michiel, M. Сұйық металл көбіктеріндегі жылдам процестерді жоғары

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

жылдамдықты синхротрондық рентген микрорадиоскопиясы арқылы зерттеу. Appl. Phys. Lett. 2008, 92, 134104–134106.

15. Rack, A.; Garcia-Moreno, F.; Vaumbach, T.; Banhart, J. Сұйық металл көбіктеріндегі жылдам құбылыстарды зерттеу үшін кеңістіктік-уақыттық микрожыратымдылығы бар синхротрондық радиоскопияны пайдалану. J. Synchrotron Radiat. 2009, 16, 432–434.

Абжанова Л. К.

Вспенивание исследуемого металла с помощью рентгеновской рентгеноскопии

Для изучения образования и эволюции металлической пены in-situ рассматривается использование рентгеновской рентгеноскопии. Выбранные результаты показывают силу рентгеновской рентгеноскопии как диагностического инструмента для вспенивания металла. Представлены качественные анализы зарождения и эволюции пены, развития дренажа, проблем с термической связью, заполнения плесени, разрыва клеточной стенки и многого другого. Кроме того, количественный анализ, основанный на серии изображений расширения пены, обеспечивающих скорость слияния, распределение плотности и т. д., выполняется с помощью специального программного обеспечения. Эти методы помогают понять пенообразующее поведение металлов и улучшить как методы пенообразования, так и качество пены.

Ключевые слова: металлическая пена, рентген, рентгеноскопия, синхротронное излучение.

Abzhanova L. K.

Foaming of the metal examined by X-ray radioscopy

The use of X-ray radioscopy for in-situ studies of metal foam formation and evolution is considered. The selected results show the power of X-ray radioscopy as a diagnostic tool for metal foaming. Qualitative analyses of foam nucleation and evolution, drainage development, thermal bonding problems, mold filling, cell wall rupture, etc. are provided. In addition, the numerical analysis based on a series of images of foam expansion, which gives the merge speed, density distribution, etc., is performed using special software. These methods help to understand the foaming behavior of metals and improve both foaming methods and foam quality.

Keywords: metal foam, X-ray, radioscopy, Synchrotron Radiation.

References

1. Banhart, J. Metall köbikleri men metallardyn öndirilisi, sipattamasy және qoldanylyu. Prog. Mater. Sci. 2001, 46, 559–632.
2. Banhart, J.; Weaire, D. Jolda qayta: Metall köbikleri tanymal boluda. Phys. Today 2002, 55, 37–42.
3. Banhart, J.; Borbély, A.; Dzieciol, K.; García-Moreno, F.; Manke, I.; Kardjilov, N.; Kaysser-Pyzalla, A.R.; Strobl, M.; Treimer, W. Rentgen және neytronдық keskindew – materialtanu және injeneriiağa arnalğan tolyqtyrғыs әdister. Int. J. Mater. Res. 2010, 101, 1069–1079.
4. Mathiesen, R.H.; Arnberg, L.; Ramsøskar, K.; Weitkamp, T.; Raur, C.; Snigirev, A. Alyumini qorytpalarynyñ qatu protsesin rentgen keskindew arqyly waqyt boyynsa zertteu. Metall. Mater. Trans. B 2002, 33, 613–623.
5. Buffet, A.; Reinhardt, G.; Schenk, T.; Nguyen-Thi, H.; Gastaldi, J.; Mangelinck-Noel, N.; Bergeon, N.; Jung, H.; Hartwig, J.; Baruchel, J. Alyumini negizindegi qorytpalardyn naqty waqyttagy және in situ qatuy synxrotronnyq säulelenw arqyly zertteu: radiografiа men topografiа әdisterin biriktiretin bölek täjiribelik жүie. Phys. Status Solidi A 2007, 204, 2721–2727.

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

6. Arnberg, L.; Mathiesen, R.H. Alyumini qorytpalarynyň qatu protsesin naqty waqyt rejiminde joğari ajyratylymdylyqtağı rentgendik beıñe mikroskopıasy. *JOM J. Miner. Met. Mater. Soc.* 2007, 59, 20–26.
7. Nguyen-Thi, H.; Reinhardt, G.; Buffet, A.; Schenk, T.; Mangelinck-Noel, N.; Jung, H.; Bergeon, N.; Billia, B.; Hartwig, J.; Baruchel, J. TGZM qwbılıstaryn sinxrotronnyq rentgen radiografiasy arqyly in situ jäne naqty waqyttagy taldaw. *J. Cryst. Growth* 2008, 310, 2906–2914.
8. Yasuda, H.; Yamamoto, Y.; Nakatsuka, N.; Yoshiya, M.; Nagira, T.; Sugiyama, A.; Ohnaka, I.; Uesugi, K.; Umetani, K. A-Cu jäne Fe-Si-Al qorytpalarynyň qatu protsesin in situ baqylaw. *Int. J. Cast. Met. Res.* 2009, 22, 15–21.
9. Griesche, A.; Garcia-Moreno, F.; Macht, M.-P.; Froberg, G. AlNiCe-balqymalarynda himialyq diffuziua täjiribeleri. *Mater. Sci. Forum* 2006, 508, 567–572.
10. Zabler, S.; Rueda, A.; Rack, A.; Riesemeier, H.; Zaslansky, P.; Manke, I.; Garcia-Moreno, F.; Banhart, J. Tüürşikleri jetildirgen jartylai qaty Al-Ge32 qorytpasynyň irilenwi: rentgen mikrotomografiasy jäne in situ radiografiua. *Acta Mater.* 2007, 55, 5045–5055.
11. Zabler, S.; Rack, A.; Rueda, A.; Helfen, L.; Garcia-Moreno, F.; Banhart, J. Sinxrotronnyq rentgen mikroradioskopıasy arqyly jartylai qaty qorytpalardağı ağındy tikelei baqylaw. *Phys. Status Solidi A* 2010, 207, 718–723.
12. Wang, Y.; Liu, X.; Im, K.S.; Lee, W.K.; Wang, J.; Fezzaa, K.; Hung, D.L.S.; Winkelman, J.R. Qurylymdy baqylaw jildamdyğın paidalanw arqyly, tyğyz swyıq ağyn dinamikasyn ultra jildam rentgen zerttewi. *Nat. Phys.* 2008, 4, 305–309.
13. Rack, A.; Garcia-Moreno, F.; Schmitt, C.; Betz, O.; Cecilia, A.; Ershov, A.; Rack, T.; Banhart, J.; Zabler, S. Polixromatty sinxrotronnyq säulelenwdi qoldana otyryp, qaty rentgen keskindewdiñ joğari keñistik-waqyttıq ajyratylymdylyq mümkindikteri. *J. X-ray Sci. Technol.* 2010, 18, 429–444.
14. Garcia-Moreno, F.; Rack, A.; Helfen, L.; Baumbach, T.; Zabler, S.; Babcsán, N.; Banhart, J.; Martin, T.; Ponchut, C.; di Michiel, M. Swyıq metall köbikterindegi jildam protsesterdi joğari jildamdyqtağı sinxrotronnyq rentgen mikroradioskopıasy arqyly zerttew. *Appl. Phys. Lett.* 2008, 92, 134104–134106.
15. Rack, A.; Garcia-Moreno, F.; Baumbach, T.; Banhart, J. Swyıq metall köbikterindegi jildam qwbılıstardy zerttew üşin keñistik-waqyttıq mikroajyratylymdylyğy bar sinxrotronnyq radioskopıany paidalanw. *J. Synchrotron Radiat.* 2009, 16, 432–434.