

«6D071000 – Материалтану және жаңа материалдар технологиясы» мамандығы
бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін диссертациялық
жұмысқа
АНДАТПА

Мережко Михаил Сергеевич

**НЕЙТРОНДАРМЕН СӘУЛЕЛЕНДІРІЛГЕН МЕТАЛДАРДАҒЫ (CU, FE)
ЖӘНЕ АУСТЕНИТТІ ТОТЫҚПАЙТЫН БОЛАТТАРДАҒЫ (12X18H10T,
AISI 304), ОҚШАУЛАНҒАН ПЛАСТИКАЛЫҚ ДЕФОРМАЦИЯ**

Жұмыстың жалпы сипаттамасы. Диссертациялық жұмыста әртүрлі зақымдаушы дозаларға дейін нейтрондармен сәулелендірілген модельдік металл материалдарының (Fe, Cu) және реакторлық аустенитті болаттарының (12X18H10T, AISI 304) үлгілеріндегі пластикалық деформацияның оқшаулануының материалтанулық зерттеулерінің тәжірибелік нәтижелері келтірілген.

Тақырыптың өзектілігі.

Атомдық реакторларының өндіруші қуаттарын жаңа күрделі жұмысқа инвестиция салмай, олардың қызмет ету мерзімін ғылыми негізде ұзарту, әлемдік және қазақстандық атом өнеркәсібін дамытудың маңызды кезеңі болып табылады. Энергетикалық ядролық реакторлардың қызмет ету мерзімі белсенді аймақ құрамдастарының қызмет етуіне, атап айтқанда, реактор корпусының және корпусішілік құрылғылардың (КІҚ) жұмысқа қабілеттілігіне байланысты. 12X18H10T және AISI 304 типті аустенитті болаттан жасалған корпусішілік құрылғылардың ресурсы: ісіну, кернеулі коррозия және төмен температурадағы радиациялық морттану сияқты радиациялық ынталандырылған әсерлердің көрінісімен шектеледі.

Аустенитті болаттардың төмен температуралы радиациялық сынғыштығы (ТТРС) нейтрондық сәулеленудің зиянды дозасының өсуімен материалдың біркелкі пластикалығының төмендеуіне байланысты. Сәулеленбеген металдарда дислокациялық ақаулы құрылымдар, қаптаманың ірі ақаулары және егіздер сияқты микро деңгейде шоғырланған деформациялық механизмдер деформация процесінде материалдың қатаюына әкеледі және деформацияның макро деңгейде шоғырлануына жол бермейді (геометриялық "мойынның" пайда болуы). Нейтрондық сәулеленудің дозасы ұлғайған сайын дислокациялық құрылымдардың ықтимал түрлерінің саны азаяды, материалдың деформациялық қатаю қабілеті басылады, бұл біркелкі пластикалықтың төмендеуіне және «мойынның» мерзімінен бұрын пайда болуына әкеледі. Нейтрондық сәулеленудің белгілі бір дозасы бар, оған қол жеткізгеннен кейін аустенитті болаттардағы мойын біркелкі деформация сатысын айналып өтіп, аққыштық нүктеден кейін бірден түзіледі, 15–40 атомға орын ауыстыру (сна), бұл 30-40 жыл жұмыс істегеннен кейінгі ядролық реакторлардың (мысалы, ҚСҚР-1000

реакторының қалқасының фрагменттері) корпусішілік құрылғыларының (КІҚ) сәулеленуінің есептік дозасымен салыстыруға болады (50 сна-ға дейін).

ТТРС мәселесін шешудің перспективті бағыттарының бірі микро деңгейде шоғырланған деформациялық механизмдерді қолдану болып табылады, оларды ынталандыру деформация процесінде қосымша күшейтуді тудыруы мүмкін және макро деңгейде шоғырлануға кедергі келтіруі мүмкін. Мұндай үрдістерге мартенситтік $\gamma \rightarrow \alpha'$ түрлену жатады. Пластикалық деформация процесінде салыстырмалы төмен температурада ($<100^\circ\text{C}$) метатұрақты тот баспайтын болаттардың аустениттік матрицасында α' -мартенсит дәндері пайда болады, олар аустенитпен салыстырғанда едәуір беріктігімен сипатталады.

Соңғы 10 жылда AISI 304 және 12X18H10T типті метатұрақты аустениттік болаттардың төмен температуралық пластикасы жоғары дозада (>40 сна) нейтронды сәулеленуден кейін күтілгеннен айтарлықтай асып кеткен жағдайлар тіркелді. Қазіргі уақытта мартенситтік $\gamma \rightarrow \alpha'$ түрленуінің осы жағдайларда пластикалық түзілудегі шешуші рөлі туралы ғылыми консенсус бар. Бір қызығы, бұл әсер 7-ден 150 сна-ға дейінгі зиянды дозалардың өте кең ауқымында байқалады.

Деформацияның динамикалық қартаюы ерекше қызығушылық тудырады. Деформация жылдамдығының белгілі бір диапазонында жоғары температурада пластикалық ағыс кезінде қоспа атомдарымен қозғалатын дислокациялардың мерзімді блокталуы орын алады. Бұл процесі материалды қосымша нығайтудың көзі ретінде қарастыруға болады.

Сәулеленген құрылымдық реакторлық материалдардың морттану және бұзылу процестерін зерттеуге арналған көптеген зерттеулерге қарамастан, әртүрлі масштабтағы концентрацияланған деформацияның даму себептері мен заңдылықтарын анықтауға қатысты мәселелер анық жеткіліксіз қамтылған. Сәулеленген құрылымдық материалдардағы деформация шоғырлануының пайда болу заңдылықтары мен ерекшеліктерінің жүйелендірілген білімдері ядролық реакторлардың қызмет ету мерзімін қауіпсіз ұзарту және ТТРС мәселесін шешу шеңберінде үлкен ғылыми және практикалық қызығушылық тудырады.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты Қазақстанның ССР-Қ және ШН 350 реакторларында нейтрондармен сәулелендірілген модельдік металл материалдарының (Fe, Cu) және реакторлық аустениттік болаттарының (12X18H10T, AISI 304) үлгілеріндегі шоғырланған пластикалық ағынның ерекшеліктерін анықтау болды.

Зерттеу міндеттері:

– ССР-Қ және ШН-350 реакторларында нейтрондық сәулелендіруге ұшыраған мыс, АРМКО-темірінің және аустенитті болат үлгілерінің бір өстік созылуына механикалық сынақтар жүргізу, олардың физика-механикалық сипаттамаларының және геометриялық мойынның қалыптасуының параметрлерін анықтау.

– Жоғары температурада деформацияланған АРМКО-темірінің динамикалық деформациясының қартаюына нейтрондық сәулеленудің әсерін анықтау.

– 12X18H10T және AISI 304 болаттарындағы мартенситті $\gamma \rightarrow \alpha'$ -түрленуінің ерекшеліктерін анықтау және оның деформацияның шоғырлануына әсерін анықтау.

– ШН-350 реакторында ұзақ уақыт жоғары дозада сәулелену нәтижесінде пайда болған микроқұрылым мен 12X18H10T аустениттік болат үлгілеріндегі шоғырланған пластикалық ағынның ерекшеліктері арасындағы байланысты орнату.

Зерттеу нысаны. ССР-Қ және ШН-350 реакторларында нейтрондармен сәулелендірілген (12X18H10T, AISI 304) реакторлық аустениттік болаттары мен көлемді орталықтандырылған (ОЦК) және бетке бағытталған (ГЦК) текше торлары бар үлгілік металл материалдар (Fe, Cu).

Зерттеу пәні. Нейтрондармен сәулелендірілген металл материалдарындағы шоғырланған пластикалық ағын.

Қорғауға шығарылатын ережелер:

1. ССР-Қ реакторында 0,05 сна дозаға дейін нейтронды сәулелендіру шоғырланған деформацияның «шынайы» мәндерінің төмендеуіне әкеліп соғады, микродеңгейде шоғырланған, қатайтатын деформациялық механизмдерінің басылуына байланысты 12X18H10T және AISI 304 аустениттік болаттарындағы тұрақты "мойынның" түзілуінің басталуына сәйкес келетін жергілікті деформация мәнін 10%-ға төмендетуге әкеледі, ал «шынайы» критикалық кернеудің шамасы тұрақты болып қалады.

2. ССР-Қ реакторында 0,006-0,06 сна диапазонында нейтрондармен сәулелендірілген АРМКО-темір құрылымында пайда болатын радиациялық сипаттағы ақаулар дислокациялық құрылымның неғұрлым күрделі түрлерінің көрінуіне ықпал ете отырып, 100-300°C температурада бір осьті созылу процесінде деформациялық динамикалық қартаюдың тежелуіне әкеледі.

3. AISI 304 болатының анағұрлым қарқынды деформацияланған-индукцияланған мартенситтік түрленуіне байланысты қосымша қатаюы сәулеленбеген және сәулеленген күйдегі ССР-Қ реакторында 0,05 сна-ға дейін 12X18H10T болатымен салыстырғанда біркелкі деформацияны 2 есе арттырады, бұл аустениттік болаттардағы макродеңгейде деформацияның мерзімінен бұрын шоғырланумен күресудің тиімді әдісі ретінде деформацияланған мартенситтік түрленуді қарастыруға мүмкіндік береді.

4. 45–57 сна-дан жоғары зақымдаушы дозаларға дейін сәулелендірілген, 12X18H10T метатұрақты аустениттік болатында сәулелендіру температурасын 305-тен 405°C-ға дейін көтеру, материалдың пластикасының 2 есе артуына және шоғырланған деформация механизмінің өзгеруіне әкеледі: стационарлық геометриялық "мойынның" дамуынан жылжымалы "мойынның" пайда болуына және оның үлгінің жұмыс аймағының бір шетінен екіншісіне ауысуына.

Тәжірибелік және теориялық әдістер. Қойылған міндеттерді жүзеге асыру үшін үлгілік металдар мен аустениттік тот баспайтын болаттардың құрылымы мен қасиеттерін зерттеудің заманауи әдістері қолданылды, оның ішінде үлгінің жергілікті микро көлемдегі фазалық құрамын бір мезгілде бақылай отырып суреттердің динамикалық корреляциясы, оптикалық және электрондық микроскопия, микроқаттылық, изохронды босату.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы және негізгі нәтижелері:

– Алғаш рет нейтрондармен төмен (<1 сна) және жоғары (>40 сна) зақымдаушы дозаларға дейін сәулелендірілген ОЦК (Fe) және ГЦК (Cu және аустениттік болаттар) кристалдық торлары бар поликристалды металдардағы деформацияның шоғырлануын жүйелі және кешенді материалтанулық зерттеу жүргізілді.

– Алғаш рет нейтрондармен сәулелендірілген ARMCO-темірінде біркелкі пластикалықты арттыру және динамикалық деформациялық қартаюды басу әсері анықталды.

– Сандық кескінді корреляциялау әдістерін қолдана отырып, ШН-350 реакторындағы сәулелену температурасына (300–400°C) байланысты жоғары сәулеленген (45–57 сна) аустенитті болаттан 12X18H10T екі түрлі деформация механизмі анықталды. Микроқұрылымдық зерттеулердің нәтижесінде бұл жағдайда пластикалықтың пайда болуының анықтаушы факторы мартенситтік $\gamma \rightarrow \alpha'$ түрленуі және материалдың құрылымында қуыстар мен екінші фазалар сияқты үлкен ақаулардың пайда болуы мен black-dots немесе кішігірім ілмектер сияқты ұсақ ақаулардан бос аймақтарды қалыптастыру болып табылады.

– Алғаш рет жоғары сәулеленген (>40 сна) 12X18H10T аустенитті болатта деформацияланған мартенситті $\gamma \rightarrow \alpha'$ түрлендіру қисықтары алынды және процестің кинетикалық параметрлері анықталды.

Алынған нәтижелердің сенімділігі мен негізділігі рецензияланатын тақырыптық журналдарда жарияланған өзекті әдеби деректерді жұмыста қолданумен байланысты; заманауи және өзекті зерттеу әдістерін қолдану, алынған нәтижелерді шетелдік коллабораторлармен талқылау. Диссертацияның нәтижелері рейтингі жоғары ғылыми журналдарда жарияланды.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы. Алынған тәжірибелік нәтижелерді тот баспайтын аустениттік болаттан жасалған атом электр станцияларының ішкі құрылғыларының өнімділігін болжау үшін, қолданыстағы өнеркәсіптік ядролық реакторлардың қызмет ету мерзімін қауіпсіз ұзартуды негіздеу үшін пайдалануға болады; сондай-ақ жоғары сәулеленген металдар мен қорытпалардың пластикалық деформациясының физикасының іргелі принциптерін әзірлеуде Қазақстанның атом энергетикасында пайдалы болатыны сөзсіз.

Диссертация тақырыбының ғылыми жұмыс жоспарларымен байланысы. Диссертациялық жұмыс ҚР БҒМ ғылыми зерттеулерді гранттық қаржыландыру бағдарламасы бойынша ҒЗЖ шеңберінде орындалды: 0380ГФ/4 «Ядролық реакторларға арналған құрылымдық материалдарының төмен температуралы (20 - 300 ° C) радиациялық сынғыштығының мәселесін шешу үшін физикалық негіздер әзірлеу», АР08052488 «Жоғары дозалы нейтронды сәулеленуден кейін реактор материалдарының пластикалығын басқару»,

Жұмыстың апробациясы ҚР ЯФИ РМК қатты дененің радиациялық физикасы бөлімінің семинарларында, сондай-ақ 14 халықаралық ғылыми конференцияларда өткізілді, оның ішінде: TMS 2021 Annual Meeting & Exhibition, 2021 (Online, USA); 20th International Conference on Environmental

Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, 2022 (Aspen, USA); NuMat2022: The Nuclear Materials Conference, 2022 (Ghent, Belgium).

Диссертация материалдары бойынша 13 мақала жарияланды, оның ішінде ККСОН ұсынған журналдарда 5 мақала, Scopus және Thomson Reuters дерекқорларында индекстелетін халықаралық конференция материалдарында 4 жұмыс жарияланды. 4 мақала шетелдік ғылыми журналдарда жарияланған:

1. **Merezhko, M.S.** Merezhko, D.A., Rofman, O.V., Dikov, A.S., Maksimkin, O.P., Short, M.P. Macro-Scale strain localization in highly irradiated stainless steel investigated using digital image correlation // Acta Materialia. – 2022. – Vol. 231 – P. 117858 (IF=9,4; Q1. CiteScore=15,1; 96-й процентиль).

2. Merezhko, D.A. Gussev, M.N., **Merezhko, M.S.**, Rofman, O.V., Rosseel, T.M., Garner, F.A. Morphology and elemental composition of a new iron-rich ferrite phase in highly irradiated austenitic steel // Scripta Materialia. – 2022. – Vol. 215 – P. 114690. (IF=6; Q1. CiteScore=10,7; 94-й процентиль).

3. **Merezhko, M.S.**, Merezhko, D.A., Tsai, K.V. Mechanical Properties of Neutron-Irradiated Armco Iron upon Plastic Deformation at Elevated Temperatures // Physics of Metals and Metallography. – 2022. – Vol. 123, № 2. – P. 193-199 (IF=1,2; Q3. CiteScore=2,0; 30-й процентиль).

4. **Merezhko, M.S.**, Maksimkin, O.P., Merezhko, D.A., Shaimerdenov, A.A., Short, M.P. Parameters of Necking Onset during Deformation of Chromium–Nickel Steel Irradiated by Neutrons // Physics of Metals and Metallography. – 2019. – Vol. 120, № 7. – P. 716-721 (IF=1,2; Q3. CiteScore=2,0; 30-й процентиль).

Барлық жарияланымдарда диссертант қорытынды мәтін жазуға (егер диссертация қолжазбаның негізгі бөлігінің 1-ші авторы ретінде көрсетілсе), қорытындыларды анықтауға қатысты. Кейбір жағдайларда ол корреспондент-автор ретінде әрекет етті.

Диссертанттың жеке үлесі

Зерттеу барысында автор поликристалды металдардағы деформацияның локализациясына жан-жақты материалтанулық зерттеулерін жүргізді, әдеби шолу негізінде алынған нәтижелерге талдау жасады, тұжырымдар жасады.

Диссертацияның көлемі мен құрылымы

Диссертациялық жұмыста пайдаланылған атаулар мен қысқартулар тізімі, кіріспе, үш бөлімнен тұратын негізгі бөлім, қорытынды және пайдаланылған әдебиеттер тізімі бар. Диссертация көлемі 120 баспа бетін, 66 суретті, 27 кестені және 160 әдеби дереккөзді құрайды.

Диссертацияның көлемі мен құрылымы

Диссертацияда қолданылған белгілер мен қысқартулар тізімі, кіріспе, үш бөлімнен тұратын негізгі бөлім, қорытынды, қосымша және пайдаланылған әдеби дереккөздердің тізімі бар. Диссертацияның көлемі – 125 баспа беттен, 66 суреттен, 27 кестеден және 160 әдеби дереккөздерден тұрады.