

Т.М. Алдабергенова , С.О. Акаев\* , А.С. Диков ,  
А.С. Ларионов , Л.А. Дикова   
Ядролық физика институты, Алматы қ., Қазақстан  
\*e-mail: s.akayev@inp.kz

## 12X18H10T СӘУЛЕЛЕНГЕН БОЛАТТЫ «ҚҰРҒАҚ» ПЯО САҚТАУ КЕЗІНДЕГІ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ АРАЛЫҚТА ПЛАСТИКАЛЫҚ ДЕФОРМАЦИЯ ОРНАТУ ПРОЦЕСТЕРІ

Бұл жұмыста 12X18H10T маркалы тот баспайтын аустенитті болат үлгілерінің 24 °C, 350 °C және 450 °C температураларда қысқа мерзімді механикалық сынақтарға ұшырағаннан кейінгі бұзылу беттерін жан-жақты зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеу үшін үлгілер БН-350 реакторының жұмыс істеп болған ядролық отынынан жасалған.

Зерттеу көп деңгейлі физикалық мезомеханика тәсілі аясында жүргізіліп, материалда әртүрлі температуралық режимдерде болатын күрделі процестерді тереңірек түсінуге мүмкіндік берді. Атап айтқанда, сынау температурасының жоғарылауымен болаттың пластикалығының өзгеруі мұқият талданды және бұл параметрдің деформацияның локализациялану жағдайларына маңызды тәуелділігі анықталды. Сынау температурасының жоғарылауымен пластиканың төмендеуі деформация локализациялану аймақтарында кернеулердің квазибіркелкі таралуымен байланысты екені көрсетілді. Бұл кернеудің локализацияланған концентрация аймақтары материалдың кеуектілігінің артуына әкелген процестерден туындаған, бұл өз кезегінде айналмалы типтегі бейімделу процестерімен байланысты болды.

Осылайша, зерттеу материал құрылымындағы жергілікті өзгерістерді ескеру маңыздылығын көрсетті, олар пайдалану шарттары өзгерген кезде оның механикалық қасиеттеріне айтарлықтай әсер етуі мүмкін. Алынған нәтижелер экстремалды жағдайларда қолданылатын аустенитті болаттарда болатын процестерді тереңірек түсінуге және ядролық және басқа да жоғары жүктемелі жүйелерде қолдануға арналған сенімдірек материалдарды әзірлеуге ықпал етуі мүмкін.

**Түйін сөздер:** аустениттік болат, пластикалық, аккомодация, фрактография, микроқұрылым

T. Aldabergenova, S. Akayev\*, A. Dikov, A. Larionov, L. Dikova  
Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan  
\*e-mail: s.akayev@inp.kz

## Accommodation processes in irradiated steel 12X18H10T during plastic deformation in the temperature range of “dry” SNF storage

This paper presents a detailed study of the fracture surfaces of 12Kh18N10T austenitic stainless-steel specimens subjected to short-term mechanical testing at various temperatures: 24°C, 350°C, and 450°C. The specimens for the study were fabricated from spent nuclear fuel of the BN-350 reactor.

The research was conducted within the framework of a multi-level approach to physical mesomechanics, which allowed for a deeper understanding of the complex processes occurring in the material under different temperature regimes. In particular, a thorough analysis of the changes in the steel's plasticity with increasing test temperature was carried out, revealing a significant dependence of this parameter on the conditions of deformation localization. It was shown that the reduction in plasticity with increasing test temperature is associated with a quasi-uniform distribution of stresses in the zones of deformation localization. These zones of local stress concentration were caused by processes that led to an increase in the material's porosity, which, in turn, was due to accommodation processes of the rotational type.

Thus, the study demonstrated the importance of considering local changes in the material's structure, which can significantly affect its mechanical properties under varying operating conditions. The obtained results may contribute to a deeper understanding of the processes occurring in austenitic steels used in

extreme conditions and aid in the development of more reliable materials for use in nuclear and other high-stress systems.

**Keywords:** austenitic steel, plasticity, accommodation, fractography, microstructure.

Т.М. Алдабергенова, С.О. Акаев\*, А.С. Диков, А.С. Ларионов, Л.А. Дикова  
Институт ядерной физики, г.Алматы, Казахстан  
\*e-mail: s.akayev@inp.kz

### Аккомодационные процессы в облученной стали 12Х18Н10Т при пластической деформации в температурном интервале «сухого» хранения ОЯТ

В данной работе представлено подробное исследование поверхности разрушения образцов нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т, подвергнутых кратковременным механическим испытаниям при различных температурах: 24 °С, 350 °С и 450 °С. Образцы для исследования были изготовлены из отработавшего ядерного топлива реактора БН-350.

Исследование выполнено в рамках многоуровневого подхода физической мезомеханики, что позволило глубже понять сложные процессы, происходящие в материале при различных температурных режимах. В частности, проведен тщательный анализ изменения пластичности стали при повышении температуры испытаний, и выявлена важная зависимость этого параметра от условий локализации деформаций. Показано, что снижение пластичности с увеличением температуры испытаний связано с квазиоднородным распределением напряжений в зонах локализации деформаций. Эти зоны локальной концентрации напряжений были вызваны процессами, которые привели к увеличению пористости материала, что, в свою очередь, было обусловлено аккомодационными процессами поворотного типа.

Таким образом, исследование продемонстрировало важность учета локальных изменений в структуре материала, которые могут существенно влиять на его механические свойства при изменении условий эксплуатации. Полученные результаты могут способствовать более глубокому пониманию процессов, происходящих в аустенитных сталях, используемых в экстремальных условиях, и помочь в разработке более надежных материалов для использования в ядерных и других высоконагруженных системах.

**Ключевые слова:** аустенитная сталь, пластичность, аккомодация, фрактография, микроструктура.

#### Кіріспе

Пайдаланылған ядролық отынынды сақтау (ПЯО) жоғары радиоактивтілігіне, ұзақ жартылай ыдырау кезеңіне және қауіпсіз сақтау қажеттілігіне байланысты атом энергетикасы саласындағы негізгі зерттеу объектілерінің бірі болып табылады. Мысалы, осы уақытқа дейін 12Х18Н10Т сәулеленген болаттан пластикалық ағынның дамуы негізінен қарастырылды [1-3]. Осылайша, механикалық сынақтардың нәтижелері деңгейінде және микроқұрылымдық зерттеулермен салыстырмалы түрде нашар ұсынылған [4].

Пайдаланылған отынды сақтауды (ПЯО) дұрыс ұйымдастыру қоршаған ортаның қауіпсіздігін қамтамасыз етуде және адамдарға радиациялық әсер ету қаупін азайтуда шешуші рөл атқарады. Заманауи сақтау әдістері материалдарға радиация, жоғары температура және коррозиялық орта сияқты әртүрлі факторлардың әсеріне ұшырайтын уақытша және

ұзақ мерзімді сақтау орындарын пайдалануды қамтиды [5,6].

Аустенитті болаттар, мысалы, 12Х18Н10Т, жоғары коррозияға қарсы және механикалық қасиеттеріне байланысты пайдаланылған отынды сақтау элементтерін жасау үшін кеңінен қолданылады. Дегенмен, ұзақ уақыт бойы агрессивті сақтау шарттарына, соның ішінде температура мен радиациялық факторларға әсер ету берілген металдың механикалық сипаттамаларын айтарлықтай өзгертуі мүмкін. Бұл өзгерістер иілгіштіктің нашарлауына, сынғыштықтың жоғарылауына және микрожарықтар мен кеуектер сияқты ақаулардың дамуына әкелуі мүмкін, бұл өз кезегінде материалдардың сенімділігін және олардың пайдалану қасиеттерін төмендетеді.

Бұл жұмыс пайдаланылған ядролық отынды (ПЯО) ұзақ сақтауды модельдейтін жағдайларға ұшыраған аустенитті болаттардың механикалық қасиеттерін зерттейді. Температуралық жағдай-

лар мен радиациялық әсердің металдың икемділігі мен беріктік сипаттамаларына әсеріне басты назар аударылады. Алынған нәтижелер (ПЯО) пайдаланылған отынды сақтау жағдайында аустениттік болаттарда болатын процестерді жақсы түсінуге және атом энергетикасында пайдалану үшін сенімді және тұрақты материалдарды жасауға мүмкіндік береді. Осыған байланысты материалдардың пайдаланылған отынның барлық сақтау мерзімі ішінде көрсетілген сипаттамаларды сақтау және уақыт өте келе бұзылмау мүмкіндігі туралы сұрақ туындайды. Сәулеленуі жоғары болаттардың беріктік сипаттамаларының өзгеруі негізінен радиациялық ісінуден және ядролық отынның газ тәріздес ыдырау өнімдерінің жиналуынан болса, аз сәулеленген болатта морттану әртүрлі сипаттағы ақаулардың пайда болуынан туындайды [7].

Аустениттік болаттар бір мезгілде жеткілікті жоғары беріктік, пластик және пластикті біріктіретін құрылымдық материал. коррозияға төзімділігі бар тұтқыр қасиеттері және осындай арнайы ыстыққа төзімділігі және магниттік еместігі. Бұл класс болаттарын тиімді пайдалану үшін легирлеуші элементтердің құрамына, термиялық және термиялық деформацияны өңдеу режимдеріне байланысты олардың құрылымдық-фазалық күйінің қалыптасу ерекшеліктерін білу қажет [8].

Жұмыстың мақсаты – «кұрғақ» ПЯО сақтаудың температуралық диапазонында шағын зақымдаушы дозаларға дейін сәулеленген аустениттік болаттың икемділігінің төмендеуіне және салыстырмалы ұзаруына әкелетін процестерді анықтау.

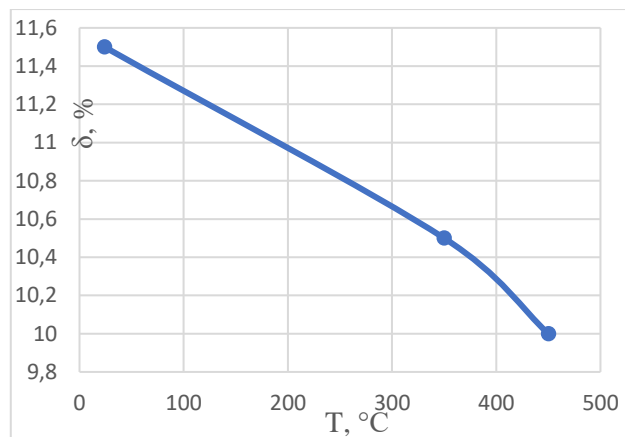
### Материалдар және тәсілдер

Зерттеу материалы ретінде аустениттік класты 12X18H10T маркалы тоттанбайтын болат таңдалды. Зерттеуге арналған үлгілер БН-350 реакторының пайдаланылған отын жинақтарының беттерінен (2-3 сна) реактор өзегі ортасынан жоғары аумақтардан кесіліп алынды. Үлгінің өлшемдері  $20 \times 2 \times 0,3$  мм болды және ұзақ мерзімді «кұрғақ» ПЯО сақтаудың қалыпты және критикалық жағдайында механикалық қасиеттерді бағалау үшін сәйкесінше 350 және 450 °C температурада бір осьті созылу және баяу тұрақты сырғу сынақтары жүргізілді.

Болат сыну бетін зерттеу сканерлеуші электрондық микроскоп Hitachi TM4000 жабдығы арқылы жүргізілді. Сынық бетінің параметрлерін талдау үшін фрактографиялық талдау әдістері қолданылды [9-11].

### Нәтижелер және талқылаулар

Механикалық созылу сынақтары әртүрлі температураларда жүргізілді: (24 °C), 350 °C и 450 °C бөлме температурасында. Сынақ температурасының жоғарылауымен 12X18H10T болаттың созылғыштығының төмендеуі байқалады, ол бұзылуға қатысты салыстырмалы ұзарудың төмендеуімен көрінеді. 1-ші суретте болаттың созылғыштығының өзгеру графигі берілген.



1-сурет – Әртүрлі температураларда кернеуде сыналған 12X18H10T сәулеленген болаттың икемділігінің өзгеруі [9]

Иілгіштіктің төмендеуінің себептерін анықтау үшін сыналған үлгілердің сыну беттері зерттелді (2-сурет). Сынық бетінің жойылу 2в, 3в, 4в суреттерде берілген. Әртүрлі температурада сыналған үлгілердің сыну макрорельефі күңгірттік пен беттің кедір-бұдырлығы сияқты созылғыш сыну белгілерімен сипатталады. Негізгі сыну жазықтығы созылу осіне перпендикуляр бағытталған. Сынақ температурасының жоғарылауы күрделірек макрорельефке әкеледі, нәтижесінде материалдың шөгуді аймақтары пайда болады. Бұл аймақтар созылу осіне шамамен 45° бұрышқа бағытталған қосымша сыну жазықтықтарын құрайды. Бұл аймақтардың ауданы көрінетін сыну аймағының шамамен 20% құрайды. Бөлме температурасында сыналған үлгілердің сыну бетінде микроқуыстардың (үлкен шұңқырлардың) сызықты қосылуы нәтижесінде пайда болатын үзілістердің айтарлықтай саны байқалады. Сынақ температурасы жоғарылаған сайын үзілістердің мөлшері мен саны айтарлықтай азаяды. Сынықтардың макрорельефіндегі анықталған айырмашылықтар сынақ температурасының жоғарылауымен сыну механизмінің өзгеруін көрсетеді.

Әртүрлі температурада сынаудан кейінгі болат сынуларының микроқұрылымы шұңқырлы микрорельефтің болуымен сипатталады. Негізгі сыну жазықтығындағы шұңқырлардың пішіні даму дәрежесі әртүрлі пішінге ие. Тепе-тең шұңқырлардан басқа, 350 және 450 °С температурада сыналған болат сынықтарында материалдың шөгу аймақтарында орналасқан кесу шұңқырлары да бар. Шұңқырлардың өлшемдері әртүрлі, 13 мкр жетеді. Шұңқырлардың қабырғаларында жылжымалы механизм арқылы шұңқырлардың өсуін көрсететін толқынды сызықтар көрінеді, бұл материалдың жоғары жергілікті пластикасын көрсетеді. Ірі шұңқырлардың түбінде олардың ядролану орны болып табылатын және пластикалық деформация ізі жоқ қалыпты пішінді болатын екінші фазалардың бөлшектері болады. Кішігірім шұңқырларда, мүмкін, олардың шығу тегінің басқа сипатын, мысалы, дислокацияның жинақталуын көрсетуі мүмкін негіздегі қосындылар жоқ. Шұңқырлар өсіп келе жатқанда, олар біріктіріліп, сыну бетінде өлшемі 20-дан 80 мкм-ге дейін болатын үзілістерді құрайды.

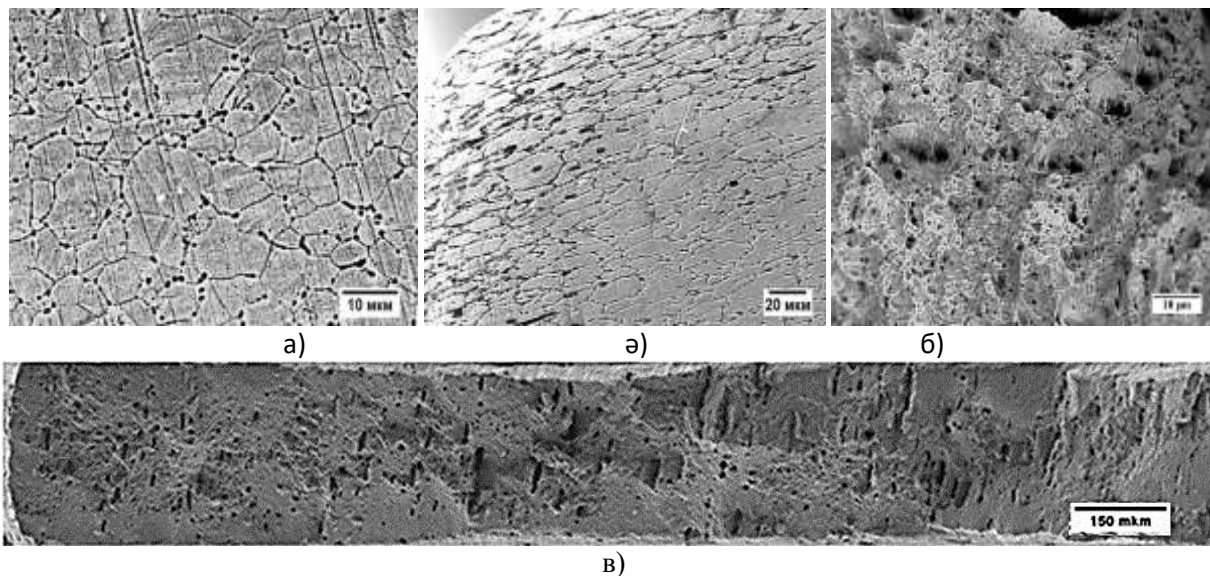
350 және 450 °С температурада сынаудан кейін үзілістер таяз болады және шұңқырлар арасында қалқалар болады. Кейбір үзілістердің ішкі қабырғаларында сырғанау сызықтары бар және олардың негізінде олардың пайда болу орны болып табылатын екіншілік фазалық түзілістер байқалады. Үзілістер мен үлкен шұңқырлар микроскопиялық тең осьті шұңқырлардың бөлу жоталарынан тұратын желімен қоршалған. Көптеген микроскопиялық шұңқырлардың пайда болуы сынақ температурасының жоғарылауымен олардың өсу орындарының ұлғаюын көрсетеді. Сынақ температурасы жоғарылаған сайын микроқуыстылардың пайда болуына кішірек бөлшектер немесе басқа құрылымдық ақаулар қатысуы мүмкін. 450 °С температурада сыну микроқұрылымының айрықша ерекшелігі үлкен микроқуыстылардың бөліну жоталарын қорғайтын шағын шұңқырлар тізбектері пайда болуы.

24 °С температурада болатын бұзылуы «бөлу» механизмі бойынша жүреді, онда «материал-бөлшек» шекара бөліміндегі микроқуыстың туындауы және өсуі жүреді. Бұл шұңқырлардың түбінде қайталама фаза бөлшектерінің болуымен және микроқуыстардың қабырғаларында дислокацияның сырғуын көрсететін толқынды сызықтармен расталады. Бұл температурадағы деструкция процесін микромеханизм бойынша біртекті деп сипаттауға болады [12-14].

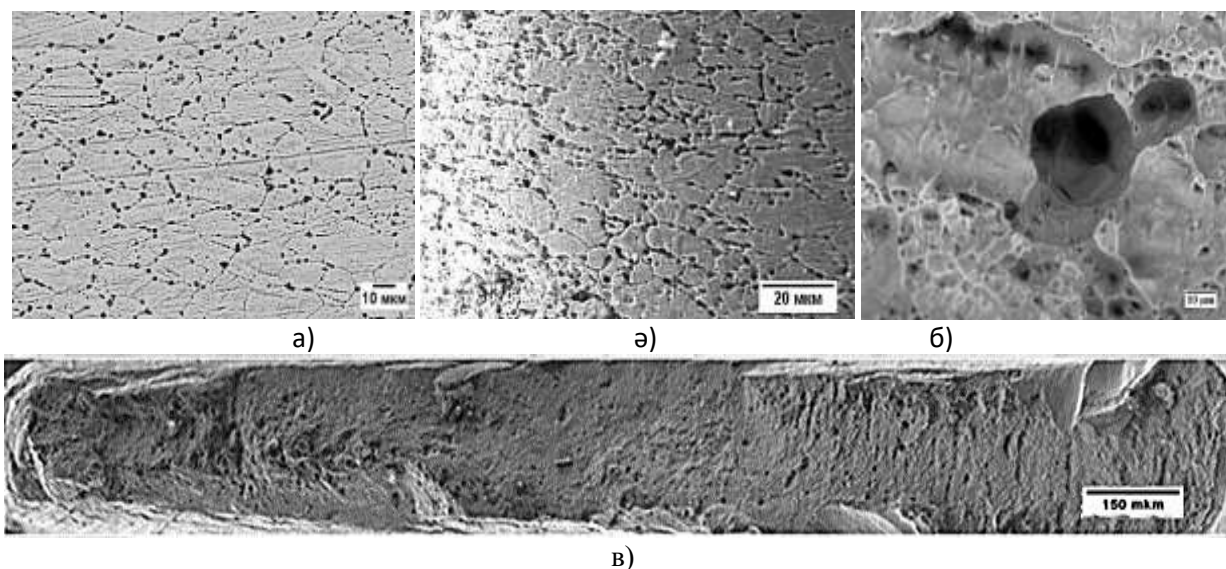
Сынақ температурасы 350-450 °С-қа дейін көтерілгенде, сыну беріктігі сақталады, бірақ сыну микромеханизмінің өзгеруі байқалады. Бұл шұңқырлар арасындағы қалқалары бар үзілістердің толық қалыптаспауынан және созылу осіне ~ 45° бұрышқа бағытталған қосымша сыну жазықтықтарының пайда болуынан көрінеді. Бұл жазықтықтар тангенциалды кернеулердің әсерінен қалыптасады және ығысудың бұзылу механизмін көрсетеді. Дислокациялардың одан әрі сырғуы ең жоғары ығысу кернеулер жазықтықтары бойымен жүреді. Ірі микроқуыстар бетіндегі микроскопиялық шұңқырлар мен шұңқырлардың бөліну жоталарының желісінің пайда болуы температураның жоғарылауымен материалдың жергілікті кеуектілігінің жоғарылауын көрсетеді [15]. Бұл механикалық өрістің біркелкі болмауына және жергілікті кернеу градиенттерінің пайда болуына әкелуі мүмкін, бұл өз кезегінде материалдың беріктік сипаттамаларын нашарлатады.

[16,17] жұмыстардың деректерінен жүргізілгендей үлкен микроқуыстардың бетінде микроскопиялық шұңқырлардың пайда болуы олардың түзілу процесіне кішірек бөлшектердің қосылуымен байланысты екенін растайды. Болат үлгілерінің беткі құрылымын зерттеу бұл гипотезаны растады. [18-20] жұмысында келтірілгендей 2а, 3а, 4а суреттерде температураның жоғарылауымен екінші фазалардың бөлшектерінің саны артады, олардың мөлшері 0,2-ден 3 мкм-ге дейін жетеді. Олар негізінен түйіршік шекараларында және олардың түйіскен жерлерінде таралған. 2ә, 3ә, 4ә - суреттерде көрсетілген сыну орнына жақын аймақта екінші фазалардың бөлшектері де табылды, бірақ олардың өлшемдері шамамен 1-3 мкм<sup>2</sup>. Дегенмен сыну аймағында өлшемі 1 мкм-ден аз ұсақ бөлшектердің іздері табылмады. Бұл бақылау екінші фазалық бөлшектер 450 °С температурада алынған сынықтарда байқалатын микрокеуектіліктің пайда болуына жанама түрде байланысты екенін көрсетеді.

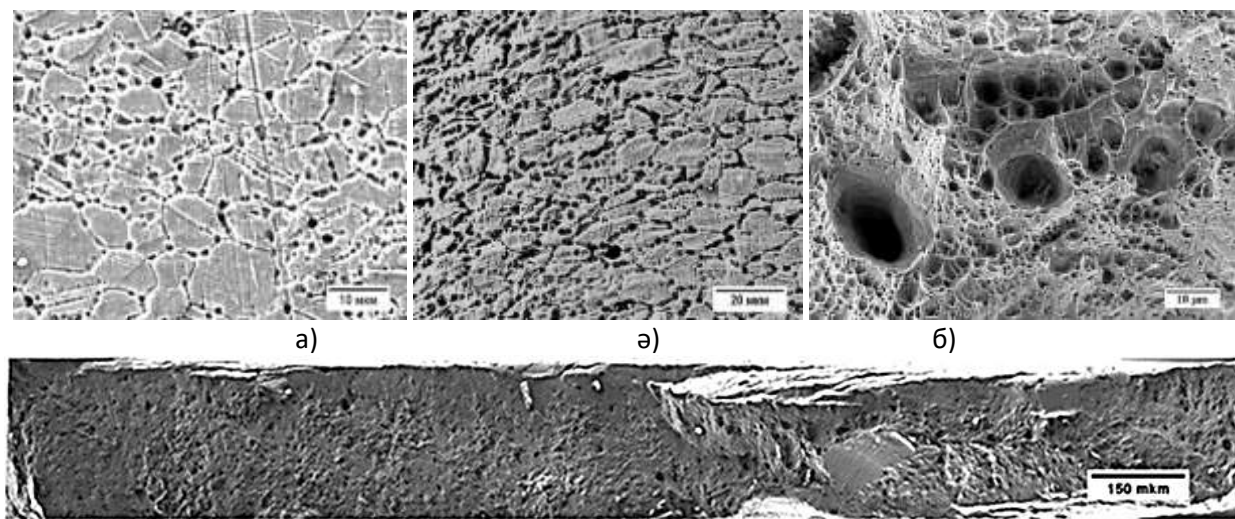
Деформациялардың локализациясы аймағында байқалатын аустенит түйірлерінің ұзаруы (4-суретте) айналмалы түрдегі белсенді аккомодация процесінің көрсетеді. [21,22] сәйкес, деформацияланатын денелердің бөліктерінің айналмалы қозғалысы, мысалы, түйірдің көршілес түйіршіктерге немесе матрицаға қатысты өз осінің айналасында айналуы мезольденгейдегі пластикалық деформацияның негізгі механизмдерінің бірі болып табылады.



2-сурет –12X18H10T болат үлгілерінің 24°C температурада сынаудан кейінгі сыну беті



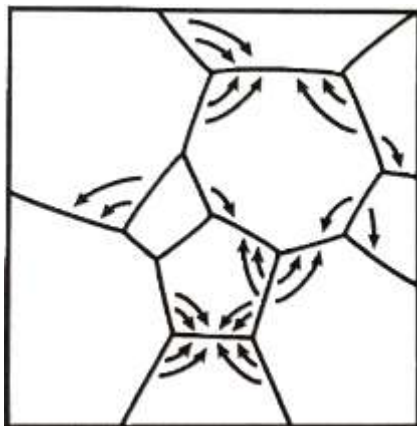
3-сурет –12X18H10T болат үлгілерінің 350°C температурада сынаудан кейінгі сыну беті



4-сурет –12X18H10T болат үлгілерінің 450°C температурада сынаудан кейінгі сыну беті



5-суретте тізбек бойынша түйіршіктердің айналдыру кезінде материалдың кеуектілігін арттыру мүмкіндігін түсіндіретін диаграмма көрсетілген. Қолданылатын кернеулердің әсерінен материалда түйіршік айналымының басталуына ықпал ететін түйіршік шекарасының сырғанау процестері индукцияланады [23-25].



**5-сурет** –Түйіршіктің бүкіл көлемі бойынша айналу схемасы.

Түйіршікке айналуына ықпал ететін қозғаушы күш дислокациялар арасындағы әсерлесудің серпімділік энергиясының төмендеуі болуы мүмкін [22,26], бұл түйіршіктің біртіндеп айналуына әкеледі. Бұл процесс түйіршіктің пішінін өзгерту және түсірілген кернеу бағытында ұзару арқылы өзгермелі жағдайларға бейімделуі үшін жүреді. Сыну орнының жанында түсірілген микроқұрылымдық фотосуреттерде (2б, 3б, 4б) келтірілген кернеулер бағытында аустенит түйірлерінің мұндай «созылуы» байқалады. Микроқуыстар түйіршіктер шекарасында да көрінеді, олар да ұзартылған пішінге ие.

Сыртқы өрістің серпімділік энергиясы төмендеген кезде [27-30], түйіршік қоршаған матрицаға қатысты тұтастай айнала алады. Бұл микроқуыстар сияқты түйіршік шекарасының ақауларының өсуіне және микроскопиялық кеуектердің пайда болуына әкеледі. Сынықта байқалатын микроскопиялық шұңқырлар негізінде екінші фазалық тұнба бөлшектерінің болмауы түйіршікке тұтастай айналдыру кезінде микроскопиялық шұңқырлардың пайда болуының жанама растауы бола алады. Осылайша, алынған нәтижелердің жиынтығы сынақ температурасының жоғарылауымен болатын илгіштігінің төмендеуі материалдың кеуектілігінің жергілікті өсуіне ықпал еткен тангенциалды кернеулер әсерінен сыну механизмінің өзгеруіне байланысты болуы мүмкін екенін көрсетеді. айналу типті аккомодациялық процестердің нәтижесінде.

### Қорытынды

Сәулеленген болаттың 12X18H10T сыну бетінің құрылымын фрактографиялық зерттеу нәтижелерін талдаудан 350 және 450 °C температурада сыну механизмі ығысуға өзгереді. Бұл өзгеріс айналмалы аккомодациялық процестердің ұлғаюынан туындаған материалдың жергілікті кеуектілігінің артуына байланысты. Нәтижесінде матери алда жергілікті кернеу градиенттері қалыптасады, бұл механикалық өрістің біркелкі болмауына және болаттың созылғыштығының төмендеуіне әкеледі.

### АЛҒЫС

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті (грант №BR21881930) қаржыландырды.

### Әдебиеттер

- 1 Ибрагимов Ш.Ш., Максимкин О.П., Садвакасов Д.Х. Мартенситное  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращение и механические свойства стали 12X18H10T, облученной нейтронами // ФММ.- 1990.- Вып.7.- С.199-201.
- 2 Максимкин О.П., Гусев М.Н. Изменение напряжений течения и латентной энергии при деформации нержавеющей стали 12X18H10T, облученной нейтронами // Письма в ЖТФ. -2003.-Т.29, вып.3. – С.1-7.
- 3 Неустроев В.С., Дворецкий В.Г., Островский З.Е. и др. Исследование микроструктуры и механических свойств стали 08X18H10T после облучения в активной зоне реактора ВВЭР-1000 // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика рад.повр. и рад. материаловед. - 2003.-Т.83, вып.3. - С.15-23.
- 4 Щербак В.И., Дмитриев В.Д. Структурные особенности при деформации облученных нейтронами аустенитных сталей // ФММ.-1987.-т.64.-Вып.3.-С.591-595.
- 5 Konarski P., Cozzo C., Khvostov G., Ferroukhi H. Spent nuclear fuel in dry storage conditions – current trends in fuel performance modeling // Journal of Nuclear Materials. – 2021. – Vol. 555. – Art.No. 153138. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2021.153138
- 6 Poinssot C., Toulhoat P., Gras J.-M., Vitorge P. Long term evolution of spent nuclear fuel in long term storage or geological disposal. New findings from the French PRECCI R&D program and implications for the definition of the RN source term in geological repository // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2014. – Vol. 39. – P. 473-476. DOI: 10.1080/00223131.2002.10875509

- 7 Was G.S. *Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and Alloys*. Second Edition. – Springer New York, 2017.
- 8 Банных И.О. Особенности формирования структурнофазового состояния современных высокопрочных аустенитных сталей. – Перспективные технологии получения материалов и методы их исследования. 21-я Международная школа-конференция имени Б.А. Калина, Москва, 17 – 19 октября 2023.
- 9 *Metals Handbook: Fractography and Atlas of Fractographs*. Volume 9 (8th Edition). – American Society for Metals, 1974.
- 10 Балтер М.А., Любченко А.П., Аксенова С.И. Фрактография - средство диагностики разрушенных деталей. – М.: Машиностроение, 1987.
- 11 *Metals Handbook: Fractography*. Volume 12 (9th edition). – ASM International, 1987.
- 12 Dikov A.S., Chernov I.I., Kislitsin S.B. Influence of the Test Temperature on the Creep Rate of 0.12C18Cr10NiTi Structural Steel Irradiated in the BN-350 Reactor // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2018. – Vol. 9(3). – P.357–360.
- 13 Матвиенко Ю.Г., Модели и критерии механики разрушения. – М.: Физматлит, 2006.
- 14 Merezko M.S., Maksimkin O.P., Merezko D.A., Shaimerdenov A.A., Short M.P. Parameters of Necking Onset during Deformation of Chromium–Nickel Steel Irradiated by Neutrons // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2019. – Vol. 120(7). – P.716-721.
- 15 Jia Xi., Hao K., Luo Zh., Fan Zh. Plastic Deformation Behavior of Metal Materials: A Review of Constitutive Models // *Metals*. – 2022. – Vol.12. – P. 2077.
- 16 Macek W., Robak G., Žak K., Branco R. Fracture surface topography investigation and fatigue life assessment of notched austenitic steel specimens // *Engineering Failure Analysis*. – 2022. – Vol.135. – Art.No.106121.
- 17 Sun Y.T., Kong X., Wang Z.B. Superior mechanical properties and deformation mechanisms of a 304 stainless steel plate with gradient nanostructure // *International Journal of Plasticity*. – 2022. – Vol.155. – Art.No.103336. DOI: 10.1016/j.ijplas.2022.103336
- 18 Panin V.E., Polyakov V.V., Syrov G.V. Evolution of mechanisms of plastic deformation in porous metals // *Russ Phys J*. – 1996. – No.39. – P. 92–96. DOI: 10.1007/BF02069250
- 19 Liu F., Fa T., Chen P.H., Wang J.T. Steady-state characteristics of fcc pure metals processed by severe plastic deformation: experiments and modelling // *Philosophical Magazine A*. – 2020. – Vol.100. – P.62-83. DOI: 10.1080/14786435.2019.1671621.
- 20 Liu H., Hu R., Xia X., Yu S. Texture Evolution and Plastic Deformation Mechanism of Cold-Drawn Co-Cr-Ni-Mo Alloy // *Metals*. – 2024. – Vol.14(6). – P.642. DOI: 10.3390/met14060642
- 21 Панин Е.В., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. – М: Наука, 1985.
- 22 Рыбин В.В., Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986.
- 23 Ask A., Forest S., Appolaire B., Ammar K. A Cosserat-phase-field theory of crystal plasticity and grain boundary migration at finite deformation // *Continuum Mech. Thermodyn*. – 2019. – Vol.31. – P. 1109-1141.
- 24 Fressengeas C., Upadhyay M.V. A continuum model for slip transfer at grain boundaries // *Adv. Model. and Simul. in Eng. Sci*. – 2020. – Vol.7. – Art. No.12. DOI: 10.1186/s40323-020-00145-6
- 25 He J., Admal N.Ch. Polycrystal plasticity with grain boundary evolution: a numerically efficient dislocation-based diffuse-interface model // *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* – 2022. – Vol.30. – Art.No. 025006. DOI: 10.1088/1361-651X/ac2f84
- 26 Cappola J., Wang J., Li L. A dislocation-density-based crystal plasticity model for FCC nanocrystalline metals incorporating thermally-activated depinning from grain boundaries // *International Journal of Plasticity*. – 2024. – Vol.172. – Art.No. 103863. DOI: 10.1016/j.ijplas.2023.103863
- 27 Останина Т.В., Швейкин А.И., Трусов П.В. Измельчение зеренной структуры металлов и сплавов при интенсивном пластическом деформировании: экспериментальные данные и анализ механизмов // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2020. – No.2. – P. 85-111. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.08
- 28 Neverov V.V., Zhitnikov P.P. Rotations of material in the shearing plastic deformation of thin layers // *Soviet Physics Journal*. – 1989. – No.32. – P. 140–143.
- 29 Chen B., Zhu L., Xin Y., Lei J. Grain Rotation in Plastic Deformation // *Quantum Beam Science*. – 2019. – Vol.3(3). – P.17. DOI: 10.3390/qubs3030017
- 30 Zhou Y., Wu W., Li J. Heterostructures impacting deformation strengthening processes in QP steels: Investigating the interplay of grain rotation, slip transfer, and back stress strengthening // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2024. – Vol.29. – P. 5340-5353. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.02.225

### References

- 1 Sh.Sh. Ibragimov, O.P. Maksimkin, and D.Kh. Sadvakasov, *Fizika Metallov i Metallovedenie* 70, 199-201 (1990) (In Russ).
- 2 O.P. Maksimkin and M.N. Gusev, *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki* 29, 1-7 (2003) (In Russ).
- 3 V.S. Neustroev, V.G. Dvoretzky, and Z.E. Ostrovsky, *Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki, Ser.: Fizika Radiatsionnykh Povrezhdenii i Radiatsionnogo Materialovedeniya* 83, 15-23 (2003) (In Russ).

- 4 V.I. Shcherbak and V.D. Dmitriev, *Fizika Metallov i Metallovedenie* 64, 591-595 (1987) (In Russ).
- 5 P. Konarski, C. Cozzo, G. Khvostov, and H. Ferroukhi, *Journal of Nuclear Materials* 555, 153138 (2021). DOI: 10.1016/j.jnucmat.2021.153138.
- 6 C. Poinsot, P. Toulhoat, J.-M. Gras, and P. Vitorge, *Journal of Nuclear Science and Technology* 39, 473-476 (2014). DOI: 10.1080/00223131.2002.10875509.
- 7 G.S. Was, *Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and Alloys*, 2nd ed. (Springer New York, 2017).
- 8 I.O. Bannykh, B.A. Kalin 21st International Conference, Moscow, 2023 (In Russ).
- 9 *Metals Handbook: Fractography and Atlas of Fractographs*, Vol. 9, 8th ed. (American Society for Metals, 1974).
- 10 M.A. Balter, A.P. Liubchenko, and S.I. Aksenova, *Fraktografiya—Sredstvo Diagnostiki Razrushennykh Detalei* (Mashinostroenie, Moscow, 1987) (In Russ).
- 11 *Metals Handbook: Fractography*, Vol. 12, 9th ed. (ASM International, 1987).
- 12 A.S. Dikov, I.I. Chernov, and S.B. Kislitsin, *Inorganic Materials: Applied Research* 9, 357-360 (2018).
- 13 Yu. G. Matvienko, *Modeli i Kriterii Mekhaniki Razrusheniya* (Fizmatlit, Moscow, 2006) (In Russ).
- 14 M.S. Merezhko, O.P. Maksimkin, et al, *The Physics of Metals and Metallography* 120, 716-721 (2019).
- 15 X. Jia, K. Hao, Z. Luo, and Z. Fan, *Metals* 12, 2077 (2022).
- 16 W. Macek, G. Robak, K. Žak, and R. Branco, *Engineering Failure Analysis* 135, 106121 (2022).
- 17 Y.T. Sun, X. Kong, and Z.B. Wang, *Int. J. Plast.* 155, 103336 (2022). DOI: 10.1016/j.ijplas.2022.103336.
- 18 V.E. Panin, V.V. Polyakov, G.V. Syrov, *Russian Physics Journal* 39, 92-96 (1996). DOI: 10.1007/BF02069250.
- 19 F. Liu, T. Fa, P. H. Chen, J.T. Wang, *Philosophical Magazine A* 100, 62-83 (2020). DOI: 10.1080/14786435.2019.1671621.
- 20 H. Liu, R. Hu, X. Xia, and S. Yu, *Metals* 14, 642 (2024). DOI: 10.3390/met14060642.
- 21 E.V. Panin, V.A. Likhachev, and Yu.V. Grinyayev, *Strukturnye Urovni Deformatsii Tverdykh Tel* (Nauka, Moscow, 1985) (In Russ).
- 22 V.V. Rybin, *Bol'shie Plasticheskie Deformatsii i Razrushenie Metallov* (Metallurgiya, Moscow, 1986) (In Russ).
- 23 A. Ask, S. Forest, B. Appolaire, and K. Ammar, *Contin. Mech. Thermodyn.* 31, 1109-1141 (2019).
- 24 C. Fressengeas and M.V. Upadhyay, *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences* 7, 12 (2020). DOI: 10.1186/s40323-020-00145-6.
- 25 J. He and N. Ch. Admal, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 30, 025006 (2022). DOI: 10.1088/1361-651X/ac2f84.
- 26 J. Cappola, J. Wang, and L. Li, *International Journal of Plasticity* 172, 103863 (2024). DOI: 10.1016/j.ijplas.2023.103863.
- 27 T.V. Ostanina, A.I. Shveykin, and P.V. Trusov, *Vestnik PNIPU. Mekhanika* 2, 85-111 (2020). DOI: 10.15593/perm.mech/2020.2.08 (In Russ).
- 28 V.V. Neverov and P.P. Zhitnikov, *Soviet Physics Journal* 32, 140-143 (1989).
- 29 B. Chen, L. Zhu, Y. Xin, and J. Lei, *Quantum Beam Science* 3, 17 (2019). DOI: 10.3390/qubs3030017.
- 30 Y. Zhou, W. Wu, and J. Li, *Journal of Materials Research and Technology* 29, 5340-5353 (2024). DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.02.225.

**Article history:**

Received 13 August 2024

Received in revised form 18 September 2024

Received in revised form 9 December 2024

Accepted 18 December 2024

**Information about authors:**

1. **Tamara Aldabergenova** – PhD, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; e-mail: tamaramus@inp.kz

2. **Serik Akayev** (corresponding author) – Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; e-mail: [s.akayev@inp.kz](mailto:s.akayev@inp.kz)

3. **Alexey Dikov** – Candidate of Technical Sciences, Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; e-mail: [dikov@inp.kz](mailto:dikov@inp.kz)

4. **Alexandr Larionov** – Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; e-mail: [larionov@inp.kz](mailto:larionov@inp.kz)

5. **Lyubov Dikova** – Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan; e-mail: l.dikova@inp.kz

**Мақала тарихы:**

Түсті – 13.08.2024

Түзетілген түрде түсті – 18.09.2024

Түзетілген түрде түсті – 09.12.2024

Қабылданды – 18.12.2024

**Авторлар туралы мәлімет:**

1. **Тамара Алдабергенова** – PhD, Ядролық физика институты, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: tamaramus@inp.kz.

2. **Серик Акаев** (автор корреспондент) – Ядролық физика институты, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: s.akayev@inp.kz.

3. **Алексей Диков** – Техника ғылымдарының кандидаты, Ядролық физика институты, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: dikov@inp.kz.

4. **Александр Ларионов** – Ядролық физика институты, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: larionov@inp.kz

5. **Любовь Дикова** – Ядролық физика институты, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: l.dikova@inp.kz