

Michael Short
Class of 1942 Career Development Associate Professor
Associate Director, Plasma Science and Fusion Center
Department of Nuclear Science and Engineering
Massachusetts Institute of Technology

NSE
Nuclear Science
and Engineering

science : systems : society



web.mit.edu/nse
77 Massachusetts Ave.
Room 24-204
Cambridge, MA 02139
USA
+1.617.347.7763
hereiam@mit.edu

17 April 2023

To the Members of the Doctoral Dissertation Review Committee
Kazakh National University named after al-Farabi
al-Farabi Ave. 71, Almaty, Republic of Kazakhstan, 050040



REVIEW

of the Doctoral Dissertation of MEREZHKO MIKHAIL-SERGEEVICH entitled
"Localized plastic deformation in metals (Cu, Fe) and austenitic stainless steels
(12Cr18Ni10Ti, AISI 304), irradiated with neutrons"

The candidate systematically examines the transition to localized plastic deformation in Fe-Cu alloys, AISI 304, and 12Cr18Ni10Ti steels irradiated with neutrons, and especially the mechanisms for the transition from uniform to localized deformation induced by martensitic phase transformations and subsequent deformation wave. On one hand, this unusually high plasticity from neutron-irradiated materials represents a good thing from the point of view of avoiding brittle fracture. On the other hand, it can be quite deleterious if localized plastic deformation can lead to highly localized component deformation under unusual stresses, leading to unpredictable geometrical changes and loss of localized coolant flow. This reviewer agrees with the practical significance and impact of this work. To this reviewer's knowledge, this thesis represents the most systematic and complete review of neutron-induced localized deformation, partially enabled by a priceless treasure trove of materials from the BN-350 reactor in Aktau, and partially enabled by the key insights of the doctoral candidate himself.

Key insights include:

- The idea that localized deformation itself still occurs at all fluences, though the degree of localized deformation decreases with increasing neutron fluence as would be expected.
- The finding that martensitic phase transformations limit localized deformation by inducing hardening in the regions where localized deformation is taking place, leading to the "deformation wave" first proposed by INP researchers including the candidate.
- The finding that the mechanism of localized deformation, with fluence held constant, is temperature-dependent, and both temperatures are expected to be found in the operation of reactors like the BN-350 used.

The candidate's entire work is most compactly and completely summarized in the publication entitled "Macro-Scale strain localization in highly irradiated stainless steel investigated using digital image correlation," published in *Acta Materialia* in 2022 (<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117858>). Here the authors, including the candidate, surprised the scientific community by announcing the unexpectedly high total deformation of 18-37% in neutron-irradiated stainless steels to approximate doses of 45-55 DPA. Such deformability of nearly any metal irradiated below 50% of its melting point would have been unthinkable, though the careful investigations by the candidate and co-authors completely changed the international scientific community's perception and intuition about what is truly possible in terms of plastic deformation. The significance of this study is that operators should be able to claim credit for higher degrees of plastic deformation at very high neutron irradiation doses, mitigating the effects of accidents such as fuel assembly distortions, seismic events, and any other events which would have been predicted to induce localized brittle fracture.

There is another vital claim buried in this thesis - in Section 4.3, the candidate mentions how "It was found that with an increase in temperature to ~100-150°C, the plasticity of the studied materials significantly decreases due to the suppression of the martensitic $\gamma \rightarrow \alpha'$ -transformation." This is very important for the safety case of transporting highly irradiated samples of the Aktau BN-350 reactor to Almaty by land, as it is likely that brittle fracture of specimens is less likely than we thought. This reviewer has read Argonne National Lab's safety studies of transporting these specimens and fuel assemblies from Aktau to Almaty, and this effect was not noted there. Therefore, the candidate mentioned the additional applicability of these findings - room-temperature transport of highly irradiated materials allows for this additional high-plasticity mode of deformation, reducing the propensity for brittle fracture during transport and handling.

It should be noted that this type of high plasticity via strain localization and deformation wave formation is expected in relatively uniform deformation stress states, and not in incidents of fretting, highly localized crack formation, or other phenomena that are not at the component scale. The candidate does not claim that the findings are general to all cases, but rather conservatively (and correctly, in this reviewer's opinion) simply states the facts of what was observed without pontificating beyond the limits of the investigations. This is what this reviewer has come to appreciate about Kazakh science - it is precise, its conclusions do not reach beyond the presented evidence, and all findings both intermediate and final are presented 100% objectively. The reviewer commends the candidate for following in this hallowed tradition of Kazakh nuclear materials science, strongly established by наш любимый профессор Максимкин Олег Прокофьевич and continued resolutely by the candidate as the current laboratory director.

This reviewer, when reviewing scientific works and PhD theses, focuses especially on the completeness of the methods, documentation of intermediate results, and verification of the repeatability of the entire experimental campaigns as one of the main indications of the quality, correctness, and completeness of a candidate's work. Here the candidate is exemplary, and this reviewer notes that the work is documented to such a degree that nearly anyone in the field would have no difficulty repeating the work of the candidate, and would also arrive at the same results using the same methods on the same specimens. No detail is

left undocumented. This reviewer both laments the serious degradation in the quality of scientific documentation of most literature in recent years, and commends the candidate for helping return the community to the proper standard of scientific repeatability. Поздравляю и благодарю, потому что я знаю так сложно написать всё на иностранном языке в статье, и теперь не так много людей которые работают так же усердно как этот кандидат. Мы должны брать пример с кандидата как писать научные статьи.

This reviewer strongly recommends that the evaluation committee note the unusually large number of international conferences and journal publications where the candidate's work has been presented and published, respectively. This reviewer was present for some of these presentations and is a co-author on some of these publications, and can speak to both the scientific significance of the results and how well the international audience (including in the USA and in Russia, where this reviewer was present) received and accepted the candidate's work.

I therefore believe that Mikhail Merezhko's dissertation work constitutes a complete and coherent body of scientific research that meets the requirements for PhD dissertations, and that the candidate deserves to be awarded a PhD degree.

Sincerely,



Michael Short

Майкл Шорт

Ассоциированный профессор по развитию карьеры группы 1942

Ассоциированный директор Центра плазменной науки и ядерной физики

Отделение ядерной науки и инженерии

Массачусетский технологический институт

17 апреля 2023 года

Членам комиссии по рецензированию докторских диссертаций Казахского национального университета имени аль-Фараби

Аль-Фараби Авеню 71, Алматы, Республика Казахстан, 050040

ОТЗЫВ

на докторскую диссертацию МЕРЕЖКО МИХАИЛА СЕРГЕЕВИЧА на тему
“Локализованная пластическая деформация в металлах (Cu, Fe) и аустенитных
нержавеющих сталях (12X18Н10Т, AISI 304), облученных нейтронами”

Соискатель систематически исследовал переход к локализованной пластической деформации в сплавах Fe-Cu, AISI 304 и 12X18Н10Т, облученных нейтронами, а также механизмы перехода от равномерной к локализованной деформации, вызванной мартенситными фазовыми превращениями и последующей волной деформации. С одной стороны, этот необычайно высокий уровень пластичности облученных нейтронами материалов представляет собой хорошее явление с точки зрения предотвращения хрупкого разрушения. С другой стороны, это может быть весьма вредно, если локализованная пластическая деформация может привести к высоко локализованной деформации компонентов при необычных напряжениях, что приведет к непредсказуемым геометрическим изменениям конструкций и потере теплоносителя. Автор рецензии согласен с практическим значением и влиянием этой работы. По его мнению, эта диссертация представляет собой наиболее систематический и полный обзор локализованной деформации, вызванной нейтронами, частично обусловленный бесценным кладом материалов из реактора БН-350 в Актау и частично обусловленный ключевыми идеями самого соискателя.

Основные идеи работы:

Идея того, что локализованная деформация сама по себе происходит в материалах при разных дозах облучения, однако её степень уменьшается с увеличением потока нейтронов, как и следовало ожидать.

Обнаружение того факта, что мартенситные фазовые превращения ограничивают локализованную деформацию через упрочнение областей, где происходит локализованная деформация, что приводит к “волне деформации”, эффекта, впервые обнаруженного исследователями из ИЯФ, включая соискателя.

Обнаружение того факта, что механизм локализованной деформации при постоянном флюенсе нейтронов зависит от температуры, и обнаруженные (два) значения температуры

наблюдается в процессе эксплуатации реакторов, таких как использованный в работе БН-350.

Работа соискателя наиболее компактно и полно описывается в публикации под названием “Макроскопическая локализация деформации в высоко облученных нержавеющей сталях, изучаемая с помощью цифровой корреляции изображений”, опубликованной в Acta Materialia в 2022 году (<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2022.117858>). В этой статье авторы удивили научное сообщество, объявив о неожиданно высокой общей деформации 18–37% в нержавеющей сталях, облученных нейтронами до приблизительных доз 45–55 сна. Такая пластичность практически любого металла, облученного ниже 50% от его температуры плавления, была бы невозможна, хотя тщательные исследования соискателя и его соавторов полностью изменили представление и общепринятые суждения международного научного сообщества о том, что действительно возможно в плане пластической деформации. Значимость этого исследования заключается в том, что инженеры могут рассчитывать на более высокие степени пластической деформации при очень высоких дозах нейтронного облучения, в процессе устранения последствий аварий, таких как искривление топливной сборки, сейсмические события и любые другие события, которые могут вызвать локализованное хрупкое разрушение.

В этой диссертации есть еще одно важное заявление, которое находится в разделе 4.3. Соискатель упоминает, что “было обнаружено, что при повышении температуры до ~100-150°C пластичность изучаемых материалов значительно снижается из-за подавления мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения”. Это очень важно для безопасной транспортировки высокооблученных образцов реактора БН-350 в Алматы по суше, так как вероятность хрупкого разрушения образцов меньше, чем предполагалось. Автор данного отзыва ознакомился с исследованиями по безопасности Аргоннской национальной лаборатории касающихся транспортировки этих образцов и топливныхборок из Актау, и этот эффект там не был отмечен. Поэтому соискатель может указывать на дополнительную применимость этих результатов - транспортировка высокооблученных материалов при комнатной температуре позволяет использовать этот дополнительный режим высокой пластичности деформации, снижая склонность к хрупкому разрушению при транспортировке и эксплуатации.

Следует отметить, что этот механизм высокой пластичности через локализацию деформации и формирование волн деформации ожидается в относительно равномерных состояниях пластического течения, а не в случаях трения, высокой локализованной трещинообразования или других явлений, которые не находятся на этом масштабном уровне. Соискатель не утверждает, что результаты относятся ко всем случаям, а скорее консервативно (и правильно, по мнению автора отзыва) просто излагает факты того, что было получено в ходе исследований, не выходя за пределы полученных в результате исследований результатов. Это то, за что автор отзыва ценит в казахской науке - она точна, ее выводы не выходят за пределы представленных доказательств, и все результаты как промежуточные, так и окончательные представлены на 100% объективно. Рецензент положительно оценивает соискателя за то, что он следует этой священной традиции казахстанской школы радиационного материаловедения, установленной “еще наш любимый профессор Максимкин Олег Прокофьевич” (оригинальный текст Майкла Шорта

на русском языке, прим. пер.) и решительно продолжаемой соискателем в качестве текущего заведующего лабораторией.

Автор рецензии, при рассмотрении научных работ и диссертаций на соискание степени доктора PhD, особое внимание уделяет полноте методов, документации промежуточных результатов и проверке повторяемости всей экспериментальной базы как к одному из основных показателей качества, правильности и полноты работы соискателя. В данном случае работа соискателя является образцовой, и автор отзыва отдельно отмечает, что работа документирована настолько, что почти любой в этой области не испытает трудностей при повторении работы кандидата и также придет к тем же результатам, используя те же методы на тех же образцах. Никакие детали эксперимента не остались не задокументированными. Автор отзыва сожалеет о серьезном ухудшении качества научной документации большинства литературных источников в последние годы, и благодарит соискателя за то, что помогает вернуть научное сообщество к правильному стандарту научной повторяемости. "Поздравляю и благодарю, потому что я знаю так сложно написать всё на иностранном языке в статье, и теперь не так много людей которые работают так же усердно как этот кандидат. Мы должны брать пример с кандидата как писать научные статьи" (оригинальный текст Майкла Шорта на русском языке, прим. пер.).

Автор отзыва настоятельно рекомендует комиссии по оценке обратить внимание на необычно большое количество международных конференций и журнальных публикаций, на которых была представлена и опубликована работа соискателя. Автор данной рецензии присутствовал на некоторых из этих презентаций и является соавтором некоторых из этих публикаций, и может говорить как о научной значимости результатов, так и о том, насколько хорошо международная аудитория (включая США и Россию, где автор присутствовал лично) приняла работу соискателя.

Я считаю, что диссертационная работа Михаила Мережко представляет собой полное и законченное научное исследование, которое соответствует требованиям для диссертаций PhD, и что соискатель заслуживает присуждения ему степени доктора философии.

Искренне,

/подпись имеется/

Майкл Шорт.

Я, **Кенжетасва Диана Серикболовна**, ИИН 890416450513, (удостоверение личности № 037494459, выдано МВД РК от 02.02.2015 г. действительно до 01.02.2025 г.), настоящим подтверждаю, что данный перевод является точным переводом данного документа и соответствует содержанию оригинала документа.

Подпись

Кенжетасва Диана Серикболовна

ИП «TRANSLATION SERVICES PRO»
ЖСН/ИИН 890416450513
Кенжетасва Диана
Аудармашы/Переводчик
Сот: +7 747 580 89 48

«пятое» мая две тысячи двадцать третьего года я, Мусатаева Айгерим Максатовна, нотариус города Алматы, действующий на основании лицензии №21015147, выданной Министерством Юстиции Республики Казахстан от 15.04.2021 года, свидетельствую подлинность подписи переводчика **Кенжетасовой Дианы Серикболовны**. Личность переводчика установлена, дееспособность и полномочия проверены.

Зарегистрировано в реестре за № *1365*

Взыскана сумма согласно ст. 30 п. 2 Закона РК «О Нотариате»

Нотариус



Musatayeva

Прочитано и прошито
Нотариус
Мусатаева Айгерим Максатовна



ET0807106810241208000D5690615

Нотариаттық іс-әрекеттің бірегей нөмірі / Уникальный номер нотариального действия