



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-128-134>  
УДК 621.771.011, 621.039.53

Поступила 31.01.2023  
Received 31.01.2023

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ БОЛЬШИХ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА НА ФОРМИРОВАНИЕ РАВНООСНОЙ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э110 МЕТОДОМ РСР

*Н. А. ЛУТЧЕНКО, А. С. АРБУЗ, Назарбаев университет, пр. Кабанбай Батыра, 53, г. Астана, Казахстан. E-mail: alexandr.arbuz@nu.edu.kz*  
*А. А. КАВАЛЕК, Ченстоховский политехнический университет, ул. Я. Г. Домбровского, 69, г. Ченстохова, Польша. E-mail: kawalek.anna@wip.pcz.pl*  
*Е. А. ПАНИН, Ф. Е. ПОПОВ, Карагандинский индустриальный университет, пр. Республики, 30, г. Темиртау, Казахстан. E-mail: cooper802@mail.ru*  
*М. К. МАГЖАНОВ, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, пр. Нурсултана Назарбаева, 56, г. Караганда, Казахстан. E-mail: mr.medet@outlook.com*

*В работе была поставлена задача – исследовать процессы изменения микроструктуры, происходящие в сравнительно больших объемных прутках под действием больших пластических деформаций. Такие большие уровни деформации обычно достижимы в процессе кручения маленьких плоских дисков под высоким давлением, но сложно достижимы в больших объемных прутках. Способ радиально-сдвиговой прокатки позволяет достичь сопоставимых сверхвысоких степеней деформации (~45 мм/мм) в комбинации с вихревым течением металла. Была проведена последовательная прокатка циркониевого сплава Э110 в экстремальных условиях на двух станах радиально-сдвиговой прокатки с общим обжатием по диаметру 185% и максимальной накопленной деформацией 46 мм/мм. Для оценки уровня деформации и распределения ее по сечению было проведено МКЭ-моделирование в Deform-3D. Полученная структура исследована методами электронной микроскопии (ПЭМ/СЭМ). Было выполнено детализированное исследование структуры на EBSD по сечению с разрешением 1 мкм. Обнаружена не сильно выраженная по сравнению с применением меньших деформаций градиентная структура с преобладанием равноосной ультрамелкозернистой структуры.*

**Ключевые слова.** Радиально-сдвиговая прокатка ультрамелкозернистой структуры, циркониевый сплав, градиентная структура, интенсивная пластическая деформация, большие деформации, компьютерное моделирование.

**Для цитирования.** Лутченко, Н.А. Изучение влияния больших сдвиговых деформаций и вихревого течения металла на формирование равноосной ультрамелкозернистой структуры циркониевого сплава Э110 методом РСР // Н.А. Лутченко, А.С. Арбуз, А.А. Кавалек, Е.А. Панин, Ф. Е. Попов, М.К. Магжанов // *Литье и металлургия*. 2023. №1. С. 128–134. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-128-134>.

## STUDY OF THE INFLUENCE OF LARGE SHEAR DEFORMATIONS AND VORTEX FLOW OF METAL ON THE FORMATION OF AN EQUIAXED ULTRAFINE-GRAINED STRUCTURE OF THE E110 ZIRCONIUM ALLOY BY THE METHOD OF RSP

*N. A. LUTCHENKO, A. S. ARBUZ, Nazarbayev University, 53, Kabanbai Batyr Ave., Astana, Kazakhstan. E-mail: alexandr.arbuz@nu.edu.kz*  
*A. A. KAWALEK, Czestochowa University of Technology, 69, Ya. G. Dombrowski str. Czestochowa, Poland. E-mail: kawalek.anna@wip.pcz.pl*  
*E. A. PANIN, F. E. POPOV, Karaganda Industrial University, 30, Republic Ave., Temirtau, Kazakhstan. E-mail: cooper802@mail.ru*  
*M. K. MAGZHANOV, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, 56, Nursultan Nazarbayev Ave., Karaganda, Kazakhstan. E-mail: mr.medet@outlook.com*

*In this work, the task was to investigate the processes of microstructure change occurring in relatively large bulk bars under the action of large plastic deformations. Such large levels of deformation are usually achievable in high pressure twisting of small flat disks, but are difficult to achieve in large bulk bars. The method of radial shear rolling makes it possible to achieve comparable*

ultrahigh degrees of deformation (~45 mm/mm) in combination with the vortex flow of the metal. Sequential rolling of the E110 zirconium alloy was carried out under extreme conditions on 2 radial shear rolling mills with a total diameter reduction  $\varepsilon = 185\%$  and a maximum accumulated strain = 46 mm/mm. To assess the level of deformation and its distribution over the section, FEM modeling was carried out in Deform-3D. The resulting structure was studied by electron microscopy (TEM/SEM). A detailed cross-sectional study of the EBSD structure was performed with a resolution of 1 mm. A gradient structure with a predominance of an equiaxed ultrafine-grained structure was found, which was not very pronounced compared to the use of smaller deformations.

**Keywords.** Radial shear rolling ultrafine-grained structure, zirconium alloy, gradient structure, intense plastic deformation, large deformations, computer modeling.

**For citation.** Lutchenko N. A., Arbut A. S., Kavalek A. A., Panin E. A., Popov F. E., Magzhanov M. K. Study of the influence of large shear deformations and vortex flow of metal on the formation of an equiaxed ultrafine-grained structure of the E110 zirconium alloy by the method of RSP. Foundry production and metallurgy, 2023, no. 1, pp. 128–134. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-1-128-134>.

## Введение

Сплавы на основе циркония являются одним из основных материалов ядерной энергетики и используются для изготовления оболочек и заглушек тепловыделяющих элементов реакторов на тепловых нейтронах (PWR, WWER) [1]. При относительно невысокой повреждаемости структуры циркония нейтронным потоком материал конструктивных элементов сильно повреждается осколками деления ядер урана. Защита поверхности оболочек и повышение их механических свойств – одна из наиболее актуальных задач современной ядерной энергетики.

Радикально повысить механические свойства металла можно путем преобразования его структуры в ультрамелкозернистое и наноструктурное состояние [2, 3]. Наличие большого количества межзеренных границ в объеме материала будет служить поверхностями стока для непрерывно образующихся радиационных дефектов, таким образом улучшая радиационную стойкость детали [4].

Для формирования ультрамелкозернистой структуры (УМЗ) металл необходимо подвергнуть интенсивной пластической деформации ( $\varepsilon > 6-8$ ) при условии всестороннего сжатия под давлением 1 ГПа и выше при невысоких температурах [3]. Существенную роль здесь также будет играть немонотонность течения металла. Реализация этих условий возможна в дискретных процессах интенсивной пластической деформации вроде прессования,ковки, кручения под высоким давлением, но труднодостижима при производстве длинномерных изделий с неизбежными растягивающими напряжениями, где применяется прокатка [6] или волочение [7]. Проще всего реализация вихревого течения металла обеспечивается в условиях всестороннего гидростатического сжатия [2]. Для получения длинномерных изделий это достижимо только методом радиально-сдвиговой прокатки [8,9]. Такая схема позволит добиться очень больших деформаций за счет скоростного сдвига слоев деформируемого металла относительно друг друга [10]. Наиболее подробно механика процесса описана в работе [9]. Этот способ получения УМЗ структуры не так широко исследован, как уже упомянутые РКУП, КВД или всесторонняя ковка, и поэтому исследование различных специфических и предельных случаев этого процесса для разных, в том числе и редких материалов имеет научный интерес.

Последние годы способ приобретает все большую популярность для существенного измельчения структуры стали [10,11], титана [12], алюминиевых и магниевых сплавов, меди, циркония [13] и других сплавов. Однако во многих случаях используется деформация на одной установке и суммарная деформация по диаметру не превышает  $\varepsilon = 50\%$ . При этом развивались существенные сдвиговые накопленные деформации до 35 мм/мм в периферийных частях образца и формировалась градиентная структура с равноосной УМЗ периферией и вытянутой текстурой в осевой части.

Основной целью данной работы является экспериментальная реализация существенно больших накопленных деформаций, чем в известных ранее работах по методу радиально-сдвиговой прокатки, и изучение их влияния на изменения структуры и свойств деформируемого металла на примере сплава Э110.

## Методология, материалы и оборудование

Для реализации больших деформаций была использована последовательная прокатка с диаметра 37 мм до диаметра 13 мм на двух прокатных станах радиально-сдвиговой прокатки с разными характеристиками. Это предельные размеры входящего прутка для большего стана и исходящего прутка для меньшего стана. В работе были использованы станы РСП-14/40 в Ченстоховском политехническом университете (Польша) и РСП 10/30 в Карагандинском индустриальном университете (Казахстан). Диапазоны их рабочих диаметров перекрываются. Первый стан фактически обеспечивает деформацию с 37 до 20 мм, а второй стан – с 30 до 13 мм (рис. 1).

Нагрев и контроль температуры образцов проводили в трубчатой печи Nabertherm R170/750/12.



Рис. 1. Использованные радиально-сдвиговые станы:  
 а – РСП 14/40 (ЧПУ, г. Ченстохова, Польша); б – РСП 10/30 (КГИУ, г. Темиртау, Казахстан)

Для оценки реализуемого напряженно-деформируемого состояния в процессе и конечного уровня накопленной деформации после прокатки на двух станах было использовано численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) через программный комплекс Deform-3D (SFTC).

Для изучения микроструктурных изменений применяли методы электронной микроскопии. Карты кристаллографической ориентации зерен и зернистой структуры в целом были сняты методом электронной дифракции обратно отраженных электронов (Electron Backscatter Diffraction – EBSD) на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения (СЭМ) Crossbeam-540 (Carl Zeiss) с EBSD приставкой NordlysNano (Oxford Instruments). Распознавание паттернов дифракции и построение карт было сделано в HKL Channel-5 Tango software (Oxford Instruments). Тонкая структура была изучена на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM-1400PLUS (JEOL) в режимах светлого поля (БФ) и дифракции выбранной области (САЕД).

Пробоподготовку образцов циркония к обоим методам электронной микроскопии проводили методом электролитической полировки на установках фирмы Struers – TenuPol-5 для ТЕМ и LectroPol-5 для СЭМ/EBSD. Разрезку образцов для всех видов последующей пробоподготовки выполняли на прецизионной отрезной машине BRILLANT-220 (QATM). Для электролитического полирования ПЭМ-образцов из центральной части прутка были вырезаны продольные пластинки толщиной 0,3 мм и из них были выбиты трехмиллиметровые диски. Для СЭМ/ EBSD из того же прутка были вырезаны более толстые пластины толщиной 2 мм.

### Математическое моделирование

Основная цель компьютерного моделирования – оценить, насколько возрастает уровень накопленной деформации в процессе последовательной прокатки циркониевого сплава на двух станах радиально-сдвиговой прокатки в технически предельных условиях. Знание предельных доступных значений и распределения уровня накопленной деформации по сечению прутка необходимо для изучения влияния очень больших сдвиговых деформаций с вихревым течением металла по слоям на изменение структуры и свойств металла.

Для модели прокатки с радиальным сдвигом использовали параметры двух станов: для прокатки от 37 до 20 мм – прокатный стан РСП 14/40 (рис. 1, а) в Ченстоховском политехническом университете, для прокатки от 20 до 13 мм – прокатный стан РСП-10/30 (рис. 1, б) в Карагандинском индустриальном университете. Валки имеют разный размер и разную конструкцию, но основные углы расположения оси валков одинаковы, так же как и влияние на особенности текучести металла и напряженно-деформированное состояние.

Исходная заготовка диаметром 37 мм и длиной 150 мм была прокатана на обоих станах с ускоренными обжатиями. Маршрут прокатки был следующим: 37–36.5–34–32–30–28–26–23–20 мм на первом стане и 20–17–13 мм на втором стане.

Температура нагрева 530 °С для прокатки была выбрана по результатам работы [13]; скорость вращения валков была равна 100 об/мин. Коэффициент трения при контакте заготовки и валков был принят равным 0,7 в качестве рекомендуемого значения для горячей прокатки в Deform3D. При прокатке валки принимались как абсолютно жесткие тела, а материал заготовки – как эластично-пластичный. База материала была создана ранее и сейчас доступна онлайн в Mendeley Data. Общий вид модели показан на рис. 2.

При анализе эквивалентной деформации (рис. 3) было обнаружено, что распределение этого параметра имеет кольцевой вид – во всех поперечных сечениях имеются четкие кольцевые зоны развития деформации. При первых проходах, когда обжатие составляло 1,5 мм за проход, разница значений



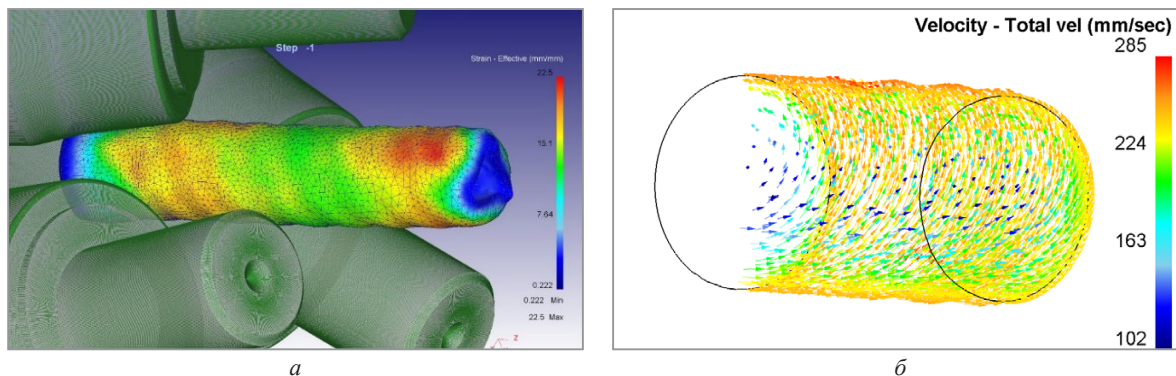


Рис. 2. Общий вид образца с эквивалентной деформацией и сеткой (а), векторы вихревого течения металла (б) в зоне деформации после радиально-сдвиговой прокатки 37–30 мм на стане РСП-14/40

деформации между центром и поверхностью высока – поверхностные слои обрабатываются до 6,5, в то время как центральные слои остаются почти необработанными (уровень деформации 1,8–2,0).

После серии обжатий на 2 мм (проходы 3–6) в осевой зоне заготовки уровень деформации плавно растёт примерно с 6,0 до 9,5, в то время как в поверхностной зоне, где наблюдается максимальный эффект сдвиговой деформации, изменяется примерно с 11 до 22.

Когда значение обжатия было увеличено до 3 мм за проход, это привело к увеличению разницы в уровне деформации между центром и поверхностью. После двух проходов (проходы 7–8) в осевой зоне уровень деформации составил приблизительно 14, в поверхностной зоне – приблизительно 29. После восьмого прохода заготовка деформировалась на стане РСП-10/30. Новая конфигурация валков и меньший размер заготовки привели к интенсификации формирования деформации сдвига по поперечному сечению. После девятого прохода с обжатием 3 мм центральные слои были обработаны до 23 уровней деформации, в то время как поверхностные слои – приблизительно до 35. После десятого прохода с обжатием 4 мм центральные слои были обработаны до 25 уровня деформации, в то время как поверхностные слои – примерно до 46.

Из моделирования процесса видно, что прокатка на стане РСП-10/30 (9 и 10 проходы) существенно повышает степень накопленной деформации в центральной зоне, что позволяет ожидать значительные изменения структуры.

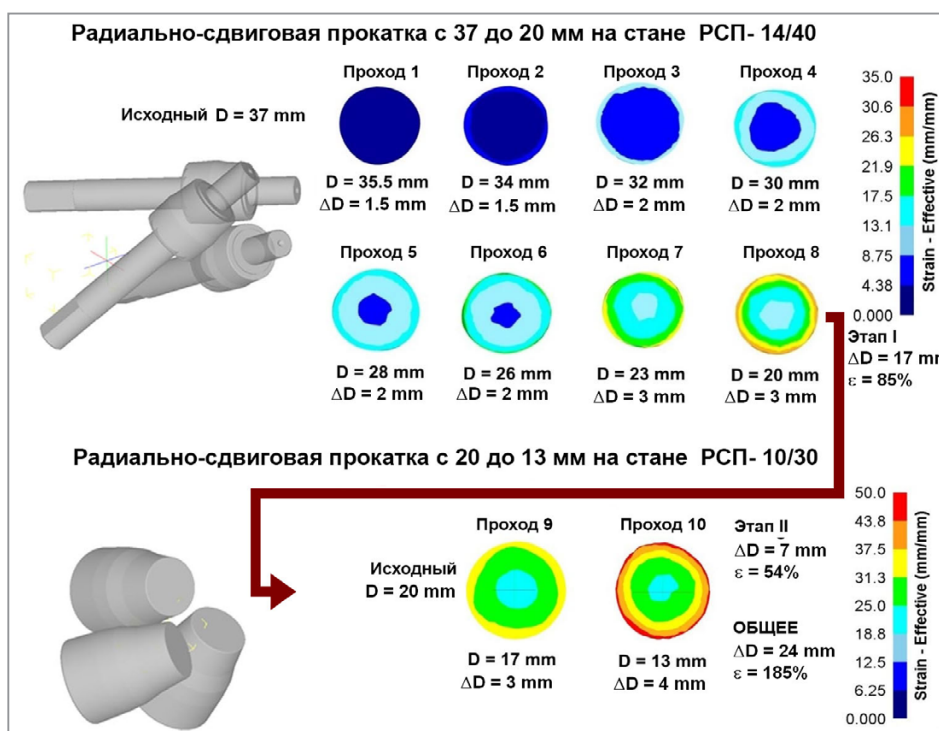


Рис. 3. Эквивалентная деформация после десяти проходов радиально-сдвиговой прокатки на прокатных станах РСР-14/40 и РСР-10/30

### Экспериментальная часть

Эксперимент был проведен путем последовательной прокатки по маршруту, описанному выше (рис. 4). Исходную заготовку нагревали в течение 37 мин до температуры 530 °С, затем последовательно, с одного нагрева прокатывали на стане РСП-14/40 восемь проходов до достижения диаметра 20 мм. Процесс перенастройки стана происходил максимально быстро и время между проходами составляло 1–2 мин. На это время для предотвращения потерь тепла заготовку снова помещали в печь. Прокатка происходила на воздухе, без охлаждения деформационной зоны валков водой или суспензией. После достижения финального диаметра заготовку интенсивно охлаждали водой.



Рис. 4. Образцы сплава Э110 по стадиям обработки и пробоподготовки

Дальнейшую прокатку полученной 20-миллиметровой заготовки на стане РСП-10/30 также проводили после ее нагрева в течение 20 мин до температуры 530 °С. Прокатку до финального диаметра 13 мм проводили с одного нагрева за два прохода с максимально допустимыми обжатиями 4 мм. Образцы после прокатки, а также дальнейшие маршруты пробоподготовки показаны на рис. 4.

После прокатки из прутка вырезали бочонок длиной 20 мм, который распиливали пополам вдоль оси. Из обеих половин сечения вырезали по пластинке – одну для приготовления ПЭМ-образцов для исследования тонкой структуры центральной зоны и периферийной зоны образца, другую использовали для электролитической полировки образца для подробного EBSD-анализа сечения.

### Результаты и обсуждение

Из графиков распределения накопленных деформаций по проходам (рис. 5) видна большая разница между центральной зоной обработанной заготовки и периферией. Также заметно выделяются последние два прохода (9 и 10), выполненные на стане РСП-10/30. Они позволяют существенно увеличить степень деформации в центральной зоне и изменить характер ее распределения. Известно, что деформация, подобная получаемой в проходах 1–8, приводит к формированию градиентной структуры с УМЗ на периферии и получению плотной текстуры в центральной зоне [13]. Существенное приращение накопленной деформации в этой зоне может изменить структуру. Чтобы прояснить происходящее внутри металла, требуется более детальное исследование сечения прутка.

Основным методом исследования микроструктуры выбран EBSD, поскольку позволяет выполнять самое точное позиционирование поля зрения для изучения изменения структуры по всему сечению прутка с достаточным разрешением. Также метод EBSD дает кристаллографическую информацию об ориентации зерен и позволяет анализировать структуру с набором статистики. ПЭМ также был использован, но как вспомогательный метод для исследования элементов тонкой структуры.

EBSD-карты были сняты по радиусу прутка с шагом в 1 мм на продольном сечении после финальной деформации (рис. 5, а). После статистической обработки была получена информация о среднем диаметре зерна и соотношении наибольшего и наименьшего размеров зерен, что является важнейшей числовой характеристикой микроструктуры. Использовать только размер зерна нельзя, потому что речь идет о возможной трансформации градиентной структуры с элементами текстуры. Каждая карта имела не менее 60 измеренных зерен, числовые значения показаны на рис. 5, а. Явно заметен определенный градиент удлинения зерен к центру прутка (уменьшение значения соотношения размеров). Средний размер при этом остается

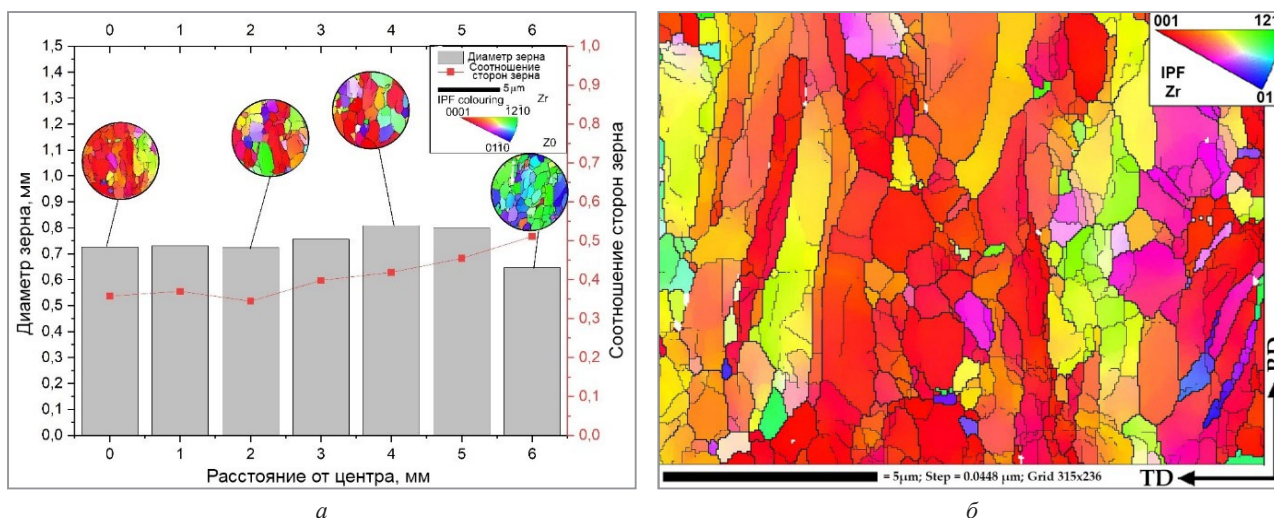


Рис. 5. EBSD-исследования структуры конечного образца по сечению (а) и пример EBSD-карты центральной области конечного образца (б)

примерно одинаковым на всем сечении с резким провалом самого крайнего значения. Также заметен градиент по ориентациям с явным увеличением преобладания к оси прутка ориентаций соосно направлению прокатки. При этом вид зерен существенно отличается от описанных ранее в осевой зоне после такого процесса [13] и больше напоминает переходную зону. Полноразмерная EBSD-карта осевой зоны показана на рис. 5, б. ПЭМ-исследование тонкой структуры периферийной зоны показано на рис. 6.

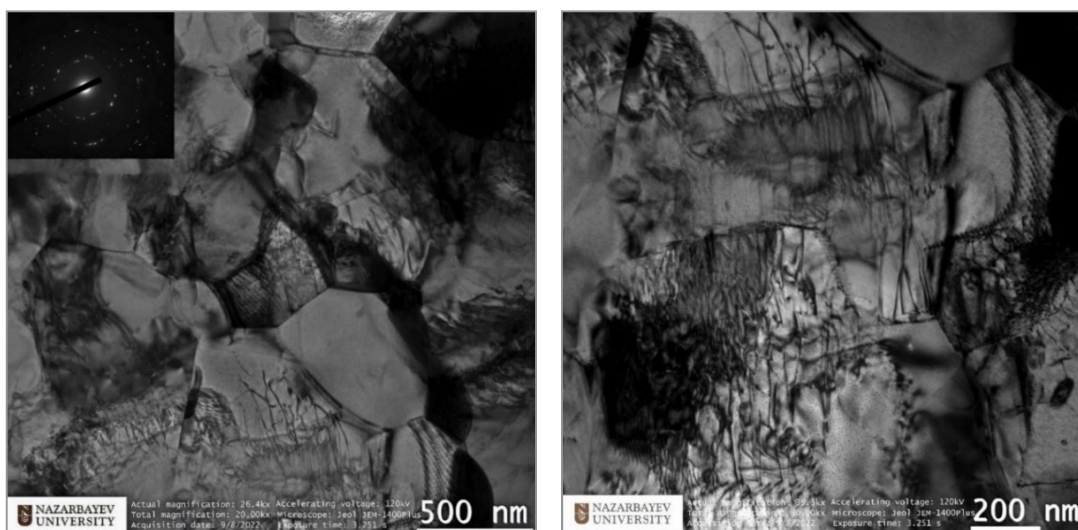


Рис. 6. ПЭМ-исследование особенностей тонкой структуры периферийной области конечного образца

## Выводы

В работе была поставлена задача исследовать процессы изменения микроструктуры, происходящие в сравнительно больших объемных прутках под действием больших пластических деформаций. Такие большие уровни деформации обычно достигаются в процессе кручения маленьких дисков под высоким давлением, но сложно достижимы в больших объемных прутках, поэтому мало исследованы. С этой целью была проведена последовательная обработка сплава Э110 на дух станах радиально-сдвиговой прокатки и получены следующие результаты:

- под действием больших деформаций не происходит дополнительного измельчения уже измельченной до размера 300–600 нм области;
- вытянутая прокатная текстура центральной части прутка при существенном повышении накопленной деформации начинает преобразовываться в более равноосный вариант;
- текущего значения деформаций недостаточно для получения полностью гомогенного сечения;
- получена равноосная УМЗ структура в относительно большом объеме образца со сниженным градиентом к центру.



Работа выполнена в рамках финансируемой из государственного бюджета темы № AP08052429 «Разработка технологии получения и исследование перспектив применения ультрамелкозернистого циркония с улучшенными механическими свойствами и повышенной радиационной стойкостью в ядерной энергетике» программы «Грантовое финансирование молодых ученых по научным и (или) научно-техническим проектам на 2020–2022 годы» (заказчик – Министерство образования и науки Республики Казахстан).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Zinkle S.J., Was G.S. Materials challenges in nuclear energy // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61(3). P. 735–758.
2. Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Zhu Y.T., Lowe T.C. Paradox of Strength and Ductility in Metals Processed Bysevere Plastic Deformation // *Journal of Materials Research*. 2002. Vol. 17(1). P. 5–8.
3. Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V.A. [et al.]. Nanomaterials by severe plastic deformation: Review of historical developments and recent advances // *Materials Research Letters*, 2022. Vol. 10(4). P. 163–256.
4. Nita N., Schaeublin R., Victoria M. Impact of irradiation on the microstructure of nanocrystalline materials // *Journal of Nuclear Materials*. 2004. P. 329–333, 953–957.
5. Etienne A., Radiguet B., Cunningham N.J. [et al.]. Comparison of radiation-induced segregation in ultrafine-grained and conventional 316 austenitic stainless steels // *Ultramicroscopy*. 2011. Vol. 111(6). P. 659–663.
6. Jiang L. Texture, microstructure and mechanical properties of equiaxed ultrafine-grained Zr fabricated by accumulative roll bonding // *Acta Materialia*. 2008. Vol. 56(6). P. 1228–1242.
7. Naizabekov A.B., Volokitina I.E., Volokitin A.V., Panin E.A. Structure and Mechanical Properties of Steel in the Process “Pressing–Drawing” // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2019. Vol. 28(3). P. 1762–1771.
8. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Dyja H., Gusseyinov N., Nemkaeva R. The Effect of Cross Rolling on the Microstructure of Ferrous and Non-Ferrous Metals and Alloys // *Metalurgija*. 2017. Vol. 56(1–2). P. 199–202.
9. Galkin S.P. Radial shear rolling as an optimal technology for lean production // *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44. P. 61–64.
10. Gordienko A.I., Pochivalov Yu. I., Vlasov I.V., Mishin I.P. Structure Formation and Mechanical Properties of Low-Carbon Steel After Lengthwise and Cross Rolling // *Russian Physics Journal*. 2022. Vol. 64(10). P. 1899–1906.
11. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Galkin S.P. Forming Features at Screw Rolling of Austenitic Stainless-Steel Billets // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. Vol. 29(6). P. 3889–3894.
12. Ta Dinh Xuan, Sheremetyev V.A., Kudryashova A.A. [et al.]. Influence of the Combined Radial Shear Rolling and Rotary Forging on the Deformation Mode of the Small-Diameter Rod Billet Made of Titanium Alloys. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2020. Vol. 61(3). P. 271–279.
13. Arbuz A., Kawalek A., Ozhmegov K. [et al.]. Using of Radial-Shear Rolling to Improve the Structure and Radiation Resistance of Zirconium-Based Alloys // *Materials*. 2020. Vol. 13(19). № 4306.

### REFERENCES

1. Zinkle S.J., Was G.S. Materials challenges in nuclear energy. *Acta Materialia*, 2013, vol. 61(3), pp. 735–758.
2. Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Zhu Y.T., Lowe T.C. Paradox of Strength and Ductility in Metals Processed Bysevere Plastic Deformation. *Journal of Materials Research*, 2002, vol. 17(1), pp. 5–8.
3. Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V.A. [et al.]. Nanomaterials by severe plastic deformation: Review of historical developments and recent advances. *Materials Research Letters*, 2022, vol. 10(4), pp. 163–256.
4. Nita N., Schaeublin R., Victoria M. Impact of irradiation on the microstructure of nanocrystalline materials. *Journal of Nuclear Materials*, 2004, pp. 329–333, 953–957.
5. Etienne A., Radiguet B., Cunningham N.J. [et al.]. Comparison of radiation-induced segregation in ultrafine-grained and conventional 316 austenitic stainless steels. *Ultramicroscopy*, 2011, vol. 111(6), pp. 659–663.
6. Jiang L. Texture, microstructure and mechanical properties of equiaxed ultrafine-grained Zr fabricated by accumulative roll bonding. *Acta Materialia*, 2008, vol. 56(6), pp. 1228–1242.
7. Naizabekov A.B., Volokitina I.E., Volokitin A.V., Panin E.A. Structure and Mechanical Properties of Steel in the Process “Pressing–Drawing”. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, Vol. 28(3), pp. 1762–1771.
8. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Dyja H., Gusseyinov N. & Nemkaeva R. The Effect of Cross Rolling on the Microstructure of Ferrous and Non-Ferrous Metals and Alloys. *Metalurgija*, 2017, vol. 56(1–2), pp. 199–202.
9. Galkin S.P. Radial shear rolling as an optimal technology for lean production. *Steel in Translation*, 2014, vol. 44, pp. 61–64.
10. Gordienko A.I., Pochivalov Yu. I., Vlasov I.V., Mishin I.P. Structure Formation and Mechanical Properties of Low-Carbon Steel After Lengthwise and Cross Rolling. *Russian Physics Journal*, 2022, vol. 64(10), pp. 1899–1906.
11. Skripalenko M.M., Romantsev B.A., Galkin S.P. Forming Features at Screw Rolling of Austenitic Stainless-Steel Billets. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, vol. 29(6), pp. 3889–3894.
12. Ta Dinh Xuan, Sheremetyev V.A., Kudryashova A.A. Influence of the Combined Radial Shear Rolling and Rotary Forging on the Deformation Mode of the Small-Diameter Rod Billet Made of Titanium Alloys. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2020, vol. 61(3), pp. 271–279.
13. Arbuz A., Kawalek A., Ozhmegov K. Using of Radial-Shear Rolling to Improve the Structure and Radiation Resistance of Zirconium-Based Alloys. *Materials*, 2020, vol. 13(19), No 4306.