

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
 ISI (Dubai, UAE) = 1.582
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 ПИИИ (Russia) = 3.939
 ESJI (KZ) = 8.771
 SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

SOI: [1.1/TAS](https://doi.org/10.15863/TAS) DOI: [10.15863/TAS](https://doi.org/10.15863/TAS)

International Scientific Journal
Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2023 Issue: 04 Volume: 120

Published: 17.04.2023 <http://T-Science.org>

Issue

Article



Vladimir Albertovich Skripnyak
 Tomsk State University
 Professor to Department of
 Deformable Solid Mechanics

Nuriddin Bakhriev
 Samarkand State University
 Lecturer to Department of
 Theoretical and Applied Mechanics

Shahzod Ne'mat o'g'li Umarov
 Samarkand State University
 Masters

Olim Muxtor o'g'li Usmonov
 Samarkand State University
 Masters

INFLUENCE OF STRUCTURE PARAMETERS ON THE REGULARITIES OF THEIR DEFORMATION AND FRACTURE OF SOME Ti-Nb ALLOYS

Abstract: In this literature review, the available scientific papers and publications in international publications were studied, which present the results of the influence of grain structure parameters on the patterns of their deformation and destruction of some Ti-Nb alloys in the form of tables and graphs to compare the available results in this area.

Key words: Plates, solutions, equations, oscillations, layer, algorithm.

Language: Russian

Citation: Skripnyak, V. A., Bakhriev, N., Umarov, Sh. N., & Usmonov, O. M. (2023). Influence of structure parameters on the regularities of their deformation and fracture of some Ti-Nb alloys. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 04 (120), 205-210.

Soi: <http://s-o-i.org/1.1/TAS-04-120-38> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2023.04.120.38>

Scopus ASCC: 2200.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИХ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ СПЛАВОВ Ti-Nb

Аннотация: В данной литературном обзоре были изучены имеющиеся научные работы и публикации в международных изданиях, в которых излагаются результаты влияния параметров зерненной структуры на закономерности их деформации и разрушения некоторых сплавов Ti-Nb в виде таблиц и графиков для сравнения имеющихся результатов в данной области.

Ключевые слова: Пластинки, решений, уравнений, колебания, слой, алгоритм.

Введение

Материалы системы Ti-Nb (титан-ниобий) на сегодняшний день являются одними из наиболее

перспективных двухкомпонентных сплавов на основе титана, представляющих большой интерес как с точки зрения фундаментальной науки, так и

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 8.771
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

с позиции их практического применения. С практической точки зрения повышенный интерес к указанным сплавам в значительной степени обусловлен началом их использования в 1990-х годах для эндопротезирования, когда было показано, что высокий модуль Юнга широко применяемых в медицине нержавеющей сталей (~ 210 ГПа) и кобальт-хромовых сплавов (~ 240 ГПа) является причиной так называемого «эффекта экранирования напряжений», приводящего к резорбции слабонагруженной костной ткани и ослаблению зоны закрепления имплантата.

Модуль Юнга ряда метастабильных сплавов Ti-Nb может быть менее 80 ГПа, что гораздо ближе к модулю Юнга кортикальной костной ткани (10...40 ГПа). Следует также отметить, что многие из наиболее перспективных титановых сплавов биомедицинского назначения, разработанных в течение двух последних десятилетий (например, сплав TNZT), основаны на системе Ti-Nb. Таким образом понимание особенностей фазовых превращений, имеющих место в этой системе, имеет принципиальное значение для разработки более сложных многокомпонентных составов с комплексом повышенных механических и эксплуатационных свойств.

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных сплавам системы Ti-Nb, большая их часть описывает структуру и свойства заготовок, подвергнутых пластической деформации и последующей закалке из β -области, что позволяет получить в материале метастабильную α'' -фазу, отличающуюся низким модулем Юнга. Лишь в относительно малом количестве работ анализируются структура и свойства сплавов Ti-Nb, полученных методом литья без последующей термической обработки. В то же время, применяя современные точные виды литья, в частности, литье в водоохлаждаемые кокалы, можно добиться высоких скоростей охлаждения материалов и уже на этапе формирования заготовок эндопротезов получить метастабильную структуру, обеспечивающую требуемый комплекс механических свойств.

Проблемы, связанные с разработкой и исследованием титано-ниобиевых сплавов, в течение длительного времени находятся в центре внимания как зарубежных, так и российских специалистов. Особо следует отметить ранние работы групп Ю.А. Багаряцкого, С.Г. Федотова и D. de Fontaine. В настоящее время в России эти сплавы подробно исследуются представителями уральской, белгородской, томской, московской, уфимской и других научных школ. Актуальную информацию о структурно-фазовых преобразованиях в сплавах системы титан-ниобий можно найти в работах, выполненных под руководством А.А. Попова, А.Г. Илларионова,

Ю.П. Шаркеева, М.И. Петрижа, О.М. Ивасишина и др. Среди современных зарубежных специалистов, изучающих Ti-Nb сплавы, следует выделить J. Eckert, M. Bönisch, M. Niinomi и др. (https://www.nstu.ru/files/dissertations/avtoferat_at_hoemmes_160284242637.pdf).

Сплавы Ti-Nb зерненной структуры, обработанные методом интенсивной пластической деформации (SPD- severe plastic deformation), могут быть адаптированы для достижения превосходных свойств и характеристик. В последнее время методы SPD, появившиеся как эффективный способ измельчения зерна, стали привлекательными для изготовления мелкозернистых биомедицинских материалов, которые можно регулировать, чтобы они обладали как благоприятными механическими свойствами, так и превосходной био совместимостью.

Сплавы **Ti-Nb** стали одним из наиболее перспективных биомедицинских металлических материалов благодаря их высокой прочности, низкой плотности, хорошей био совместимости и отличной коррозионной стойкости. По сравнению с традиционными титановыми сплавами мелкозернистые титановые сплавы **Ti-Nb** обладают более высокой прочностью, лучшей коррозионной стойкостью и усталостными характеристиками. Более того, сплавы мелкозернистой упаковки обычно используются для ортопедических и дентальных имплантатов, могут вызывать врастание костной ткани, повышать межфазную прочность и ускорять процесс восстановления [1]. В данном источнике рассмотрены последние разработки, связанные с получением ультрамелкозернистого титана и биомедицинских титановых сплавов различными методами SPD, и многие другие современные технологии получения зернистой структуры сплавов **Ti-Nb**. Однако, не рассмотрены закономерности их деформации и разрушения в зависимости от величины зерен.

В исследованиях [2] рассматриваются процессы анализа сплавов **Ti-18Nb-13Zr** и **Ti-41.1Nb-7.1-Zr**. Анализ поведения данных сплавов демонстрирует типичное нелинейное поведение напряжения-деформации, даже в упругой области. Кроме того, даны параметры значения которых зависят от напряжения и деформации, можно узнать поведение материала при различных уровнях напряжения. Таким образом, методология, используемая в этой работе, доступна, однако осложняется многофакторностью подбираемого состава, дополнительных деталей для характеристики новых сплавов, разработанных для применения в качестве биоматериала. Есть надежда, что настоящие результаты и обсуждения предоставят полезную информацию для фундаментального

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 8.771
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

понимания реального поведения материалов, при изучении влияния параметров зеренной структуры на закономерности их деформации и разрушения сплавов **Ti-Nb**.

Детали из **Beta** титановых сплавов используются в передовых аэрокосмических системах из-за их высокого соотношения прочности к весу и отличительной стойкости коррозии. Производство титановых сплавов методом порошковой металлургии может привести к существенному снижению стоимости, по сравнению с литейным и ковными процессами, потому что, при этом можно избежать дополнительных рабочих операций и снизить издержки производства.

Изучение работ [3] показывают, что, **Beta Ti-45Nb** и **Ti-50Nb** можно получить смешанно-элементным методом с последующим одноосным и холодным изостатическим прессованием с последующим уплотнением при спекании. Спеченные образцы были изучены рентгенофазовой дифрактометрией по XRD (X-ray diffraction), выполнен микроструктурный анализ при помощи электронной микроскопии, по SEM (A scanning electron microscope), твердость полученных сплавов определены по Виккерсу вдавливанием алмазных пирамид, удельная масса по методу Архимеда и модуль упругости по резонансу УЗИ.

Согласно [3], спеченные образцы имели только **Beta**-фазу, более высокую твердость и более низкий модуль упругости по сравнению со сплавом **Ti6Al4V**, а экспериментальное значение удельной массы близко к теоретической удельной массе. Эти характеристики достаточны для их применения для изготовления некоторых аэрокосмических деталей.

Современная альтернатива классическим металлургическим концепциям называется теоретическое проектирование материалов с заданными свойствами (TGMD- theory-guided materials design). Концепция сочетает в себе квантово-механические расчеты термодинамической стабильности и монокристаллические упругие свойства различных фаз с специфичной для микроструктуры гомогенизацией. Методы для прогнозирования макроскопических экспериментально определяемых упруго-деформационных параметров новых материалов [4]. Эта на подобии схемы масштабного моста, напрямую связывает микро и макроструктурных уровней, позволяет систематически сканировать многочисленные химические составы с помощью высокопроизводительного квантово-механического расчета. Таким образом, осуществляется предварительный отбор наиболее перспективных материалов-кандидатов.

Следовательно, достигается значительное сокращение экспериментальных затрат и времени при проектировании новых составов со свойствами, определяемыми расчетом переменных уравнения. Стратегия TGMD успешно применяется, например, для разработки сверхлегких бинарных сплавов **Mg-Li**, оптимизированных по отношению к нескольким противоречивым критериям, таких как упругая жесткость, модуль сдвига и объемный модуль [4] и существующих многокомпонентных материалов со сложной микроструктурой, чтобы упростит принцип структурообразования и свойства, обеспечит надежность разрабатываемых композитных составов [4].

Получены абстрактные сплавы **Ti-Nb-Zr** на основе α' -фазы с низким модулем Юнга и высокой прочностью. Охарактеризованы их микроструктура и механические свойства. Выясняется, что кристаллическая решетка расширена за счет добавления Nb и Zr, а также присутствия небольшого количества α'' -мартенсита, что может быть причиной для достижения низкого модуля Юнга. Сплав **Ti-15Nb-9Zr** со сверхнизким модулем 39 ГПа и высокой прочностью 850 МПа, может быть потенциальным кандидатом для биомедицинских применений [5].

Как типичные материалы для применения имплантатов, для коммерческих целей чистый титан (Ti) и сплав **Ti-6Al-4V** широко используются в биомедицине как материал с высокой био совместимостью, с высокой удельной прочностью, отличительной коррозионной стойкостью и низкой эластичностью по сравнению с нержавеющей сталью и сплавами Co-Cr-Mo [5].

Тем не менее, некоторые проблемы, например, токсичность таких элементов, как V, Al и так называемое «экранирование напряжения», вызванное модулем несоответствие между имплантатами (110 ГПа) и окружающими костные ткани (10–30 ГПа) все еще существуют в традиционно используемых биоматериалах на основе титана [5]. Из-за изначально более низкого модуля по сравнению с α - и титановые сплавы на основе $\alpha&\beta$, серия титановых сплавов β -типа, а также кандидаты для биомедицинских приложений были разработаны недавно добавлением нетоксичных элементов в качестве β -стабилизаторов или упрочняющим легированием элементов, включая Nb, Mo, Ta, Zr и Sn [5]. Металлургия титановых сплавов, большое количество β -стабилизатора элементы должны быть включены, чтобы сохранить β -фазу при комнатной температуре, температуры закалкой. На самом деле, большинство недавно разработанных биомедицинские титановые сплавы с низким модулем Юнга содержат

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 8.771
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

значительное количество Nb или Ta для стабилизации β -фазы [5].

Следовательно, эти сплавы имеют гораздо более высокую стоимость, чем чистый титан, и **Ti-6Al-4V** за счет добавления дорогостоящих Nb и Ta. В кроме того, большое количество тяжелых элементов, таких как **Nb, Ta, Mo** и **Sn** неизбежно приведут к значительному увеличению плотности β -типа титановые сплавы. Поэтому исследования и разработки биомедицинских титановые сплавы с низкой стоимостью, низким модулем Юнга и легким весом имеют такое большое значение для биомедицины.

Ультрамелкозернистые материалы, обработанные интенсивной пластической деформацией (SPD- severe plastic deformation) которые могут быть адаптированы для достижения превосходных свойств и производительности. В последнее время методы SPD, ставшие эффективным способ измельчения зерен в сплавах, стали привлекательными для изготовления ультрамелкозернистых биомедицинских материалов, которых можно регулировать, для получения благоприятных механических свойств, так и для получения превосходной биосовместимости. Биомедицинские титановые сплавы стали одним из наиболее перспективных биомедицинских металлических материалов, благодаря их высокой прочности, низкой плотности, хорошей биосовместимости и очень высокой коррозионной стойкости. По сравнению с традиционными титановыми сплавами ультрамелкозернистые, биомедицинские титановые сплавы обладают повышенной прочностью, улучшенной коррозионной стойкостью и в них устранены усталостные характеристики. Более того, ультрамелкозернистые биомедицинские титановые сплавы, которые используются для ортопедических и зубных имплантатов, могут вызвать врастание костной ткани, при этом увеличивают межфазную прочность и ускоряют восстановленный процесс.

Исследованиях [6] рассматриваются последние разработки, связанные с производством ультрамелкозернистого титана и биомедицинских титановых сплавов различными свойствами, полученные методом **SPD**, также разработаны технологии получения мелкозернистой структуры, такие как: * - равноканальное угловое прессование (**ECAP**), - кручение под высоким давлением (**HPT**), - накопительная прокатка (**ARB**) и обработка с трением и перемешиванием (**FSP**). Можно ожидать что, в ближайшем будущем эти методы будут использоваться в качестве методов для непрерывного производства биоматериалов **UFG** в больших масштабах и в промышленном применении.

В работе авторов *Taek-Kyun Jung u др.* [7] поставлена задача исследования механических свойств метастабильного сплава β -Ti-Nb-Sn, не подвергающегося деформационному α'' -превращению, для сравнения со свойствами менее стабильного сплава β -Ti-Nb-Sn. Для достижения этой цели был выбран сплав Ti-25Nb-11Sn с низким содержанием Nb, поскольку дорогостоящее содержание Nb снижено, чтобы сохранить метастабильную монофазу β для будущих коммерческих применений. Предел текучести, предел прочности при растяжении, относительное удлинение и модуль Юнга были исследованы в ходе испытаний на растяжение в зависимости от температуры термообработки после холодной штамповки для разработки имплантатов из сплава β -Ti с низким модулем Юнга и высокой прочностью.

Как только достигается низкий модуль Юнга с высоким пределом текучести, сплав можно применять не только в ортопедических имплантатах, но и в ортодонтических устройствах, поскольку ожидается большая упругая деформация восстановления, возникающая в соответствии с законом Гука. В статье [7] также обсуждается влияние термической обработки на восстановление упругой деформации путем оценки коэффициента упругости.

В работе авторского коллектива *Holger Schwab u др.* [8] подробно приведена способ получения сплава Ti-45Nb методом порошковой металлургии. При этом, стержни Ti-Nb (4 кг), используемые для производства порошка, были приобретены у ATI (Albany, NY, USA-Албани, штат Нью-Йорк, США). Распыление стержней в сферический порошок при помощи газа (GAP- gas atomized powder) был произведен по методу EIGA (Electrode Induction-melting Gas Atomization) в атмосфере аргона (чистота 99,999%) компанией TLS Technik (Bitterfeld-Wolfen, Германия). Для влажного просеивания применяли (жидкость: изопропиловый спирт) и были отобраны частицы порошка в диапазоне $20 < d < 100$ мкм. Объемные образцы были получены из GAP с использованием устройства SLM-250HL (SLM- Selective Laser Melting), оснащенного непрерывным лазером Nd-YAG (Pmax: 400 Вт, непрерывный режим, λ : 1054 нм и размер камеры построения: 250 мм \times 250 мм \times 350 мм) с размером головки пучка \sim 80 мкм. Образцы были изготовлены на подложке из Ti-45Nb, а камера построения была заполнена газообразным аргоном высокой чистоты (чистота 99,9%), чтобы избежать окисления образцов во время процесса SLM. Для предотвращения притока кислорода из атмосферы в камере построения поддерживалось избыточное давление 10 mbar.

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 8.771
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

Как утверждают авторы [8], образцы Ti-45Nb были успешно изготовлены методом SLM с тремя различными наборами параметров. Рентгенограммы показывают наличие β -фазы с уширением пиков по сравнению с GAP, что свидетельствует о наличии внутренних напряжений и/или измельчении зерна. Электронно-микроскопические изображения показывают наличие эллиптических зерен с Ti по границам. Как микротвердость по Виккерсу, так и результаты испытаний на сжатие доказывают, что прочность образцов SLM увеличивается с увеличением подводимой энергии.

В работах Российских ученых [9,10], экспериментальными методами и компьютерного моделирования исследованы неупругая деформация и разрушение на мезомасштабном уровне ультрамелкозернистых (УМЗ) легких сплавов с распределением зерен по размерам в широких условиях нагружения. По данным структурных исследований алюминиевых и магниевых УМЗ-сплавов разработаны расчетные многомасштабные модели представительного элемента объема (ЭОП) с унимодальным и бимодальным распределением зерен по размерам. Критическое напряжение разрушения УМЗ-сплавов на мезомасштабном уровне зависит от относительных объемов крупных зерен. Зарождение микротрещин при квазистатическом и динамическом нагружении связано с локализацией деформации в парциальных объемах УМЗ с бимодальным распределением зерен по размерам. Микротрещины возникают вблизи границ крупных и ультрамелких зерен. Выявлено, что возникновение бимодального

распределения зерен по размерам приводит к повышению пластичности УМЗ сплавов, но снижению предела прочности при растяжении.

По данному направлению исследований представлены аналогичные работы, где влияние среднего размера зерна на предел текучести при сжатии и растяжении было установлено ранее для алюминиевых, титановых и магниевых сплавов. Установлено, что при уменьшении среднего размера зерна металлов и сплавов менее нескольких микрометров напряжение течения при комнатной температуре легких сплавов увеличивается, но уменьшается удлинение до разрушения. Такое механическое поведение сплавов с микрометровым и субмикронным средним размером зерна наблюдается у легких сплавов в широком диапазоне скоростей деформации [11-14]. Легкие сплавы с бимодальным гранулометрическим составом обладают отрицательной скоростной чувствительностью предела текучести и более высокой пластичностью при квазистатических скоростях деформации [12-15]. Сопротивление росту трещин в УМЗ сплавах с бимодальным гранулометрическим составом увеличивается за счет прогиба микротрещин на границах между УМЗ и крупнозернистой (КЗ) областями. Влияние распределения размера зерна на механическое поведение легких сплавов при высоких скоростях деформации изучено недостаточно. Целью данной работы было более полное понимание физических механизмов деформации и разрушения легких сплавов с распределением размеров зерен при импульсном нагружении.

References:

1. Schneidera, S., Schneidera, S. G., Marques da Silvab, H., & de Moura Netob, C. (n.d.). *Study of the non-linear stress-strain behavior in Ti-Nb-Zr alloys*. Retrieved from <https://researchgate.net/publication/250029311>
2. Lin, Zh., Wang, L., Yeung, K.W.K., & Qin, J. (n.d.). *The Ultrafine-Grained Titanium and Biomedical Titanium Alloys Processed by Severe Plastic Deformation (SPD)*. Retrieved from www.researchgate.net/publication/274287280
3. Martins, G.V., Silva, C.R., Nunes, C.A., Trava-Airoldi, V.J., Borges Junior, L.A., Machado, J.P. (n.d.). *Beta Ti-45Nb and Ti-50Nb Alloys Produced by Powder Metallurgy for Aerospace Application*. Retrieved from www.researchgate.net/publication/40741470
4. Friak, M., Art Counts, W., Duancheng, Sander, B., Holec, D., Raabe, D., & Neugebauer, J. (n.d.). *Theory-Guided Materials Design of Multi-Phase Ti-Nb Alloys with Bone-Matching Elastic Properties*. Retrieved from www.researchgate.net/publication/232250021
5. Liu, Q., Meng, Q., Guoa, S., & Zhao, X. (n.d.). *α' Type Ti-Nb-Zr alloys with ultra-low Young's modulus and high strength*. Retrieved from <https://researchgate.net/publication/259140515>
6. Lin, Zh., Wang, L., Yeung, K.W.K., & Qin, J. (n.d.). *The Ultrafine-Grained Titanium and Biomedical Titanium Alloys Processed by Severe Plastic Deformation (SPD)*. Retrieved from www.researchgate.net/publication/274287280
7. Jung, T.-K., Naoya, S. S., & Hanada, M.Sh. (2012). *Mechanical properties and*

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
PIHII (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 8.771
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

- microstructures of β Ti-25Nb-11Sn ternary alloy for biomedical applications.* Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.12.072>
8. Schwab, H., Prashanth, K. G., Löber, L., & Kühn, U. (n.d.). *Selective Laser Melting of Ti-45Nb Alloy.* Retrieved from www.mdpi.com/2075-4701/5/2/686/htm
 9. Skripnyak, V.A., Skripnyak, N.V., Skripnyak, E.G., & Skripnyak, V.V. (n.d.). *Influence of Grain Size Distribution on the Mechanical Behavior of Light Alloys in Wide Range of Strain Rates.* Retrieved from <https://researchgate.net/publication/312388203>
 10. Skripnyak, V.A., Skripnyak, V.V., & Skripnyak, E. G. (n.d.). *The Mechanical Behavior of Metal Alloys with Grain Size Distribution in a Wide Range of Strain Rates.* Retrieved from www.researchgate.net/publication/321473825
 11. Skripnyak, V.A. (2012). *"Mechanical behavior of nanostructure and ultrafine-grained materials under shock wave loadings.* Experimental data and results of computer simulation", in "Shock Compression of Condensed Matter-2012", AIP Conference Proceedings 1426 , AIP, Melville, NY, 2012, pp. 965-970.
 12. Ulacia, I., Salisbury, C.P., Hurtado, I., et al. (2011). *J. of Materials Processing Technology.* 211, 830-839.
 13. Raesinia, B., Sinclair, C. W., Poole, W. J., & Tome, C. N. (2008). *Mater. Sci. Eng.* 16, 025001 (15pp).
 14. Zhu, L., Shi, S., Lu, K., & Lu, J. (2012). *Acta Mater.* 60, 5762-5772(2012).
 15. Skripnyak, V.A., Skripnyak, E.G., Skripnyak, N.V., Vaganova, I.K., & Skripnyak, V.V. (2014). *"Failure mechanisms of light alloys with a bimodal grain size distribution"*, in: 11th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI)", Barcelona, Spain, 25-29, July. 2014 IV: 3915-3925.