

Р. К. Исламгалиев, К. М. Нестеров, Э. Д. Хафизова,  
А. В. Ганеев, Е. Р. Голубовский, М. Е. Волков

## ПРОЧНОСТЬ И УСТАЛОСТЬ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК4-1

В работе изучено влияние равноканального углового прессования на прочность и усталость алюминиевого сплава АК4-1. Методом просвечивающего электронного микроскопа определены средний размер зерна, форма и размер частиц выделений. Проведено сравнение предела прочности и предела выносливости в ультрамелкозернистых образцах (УМЗ) и крупнозернистых образцах при температуре 20 и 175 °С. *Ультрамелкозернистые сплавы; прочность; усталость*

В последние годы формирование УМЗ структуры в различных металлах и сплавах с целью достижения высоких механических свойств становится одним из наиболее активно развиваемых направлений исследования в ведущих отечественных и зарубежных научно-исследовательских центрах [1–4].

В частности, для получения объемных УМЗ заготовок конструкционного назначения был развит целый ряд методов интенсивной пластической деформации (ИПД), отличительной особенностью которых является применение предельных степеней деформации в условиях высоких приложенных давлений при относительно низких температурах [1].

Вместе с тем измельчение зеренной структуры в алюминиевых сплавах методами ИПД имеет ряд важных особенностей. В диапазоне температур 20–150 °С закаленные образцы алюминиевых сплавов имеют более низкую деформационную способность в сравнении с чистыми металлами и в процессе равноканального углового прессования разрушение образцов и заготовок может происходить уже на начальных стадиях деформирования. Кроме того, в термически упрочняемых алюминиевых сплавах в интервале температур 150–200 °С наблюдаются процессы старения, ведущие к выделению упрочняющих частиц вторых фаз.

Все это создает дополнительные возможности для повышения свойств металлических сплавов, но требует оптимизации технологических режимов получения объемных УМЗ заго-

товок предназначенных не только для фундаментальных исследований, но и имеющих инновационный потенциал для применения в качестве авиационных материалов.

В частности, перспективной областью применения УМЗ заготовок алюминиевых сплавов являются лопатки вентилятора авиационного газотурбинного двигателя. В этом случае для применения алюминиевых сплавов в качестве материала для лопаток вентилятора необходимо повысить их удельную статическую и циклическую прочность, а также сохранить термическую стабильность до температуры 175 °С, что откроет новые возможности для совершенствования конструкции лопаток.

Поэтому целью настоящей работы являлось изучение структуры и механических свойств ультрамелкозернистых образцов полученных методом РКУП при различных температурах на примере алюминиевого сплава АК4-1, который относится к классу термически стабильных материалов [5].

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве материала для исследований был выбран термически упрочняемый алюминиевый сплав АК4-1 системы Al-Cu-Mg-Si, химический состав которого приведен в табл. 1, вес. %.

Перед проведением РКУП заготовки алюминиевого сплава АК4-1 диаметром 40 мм и длиной 160 мм были подвергнуты нагреву при температуре 530 °С в течение 1 ч с последующей закалкой в воду. РКУП проводили при различных температурах в диапазоне 120–430 °С на оснастке с углом пересечения каналов 120 °С по маршруту Вc. Количество проходов в каждом случае определяли исходя из критерия сохранения целостности заготовок.

Контактная информация: 8(347)273-52-44

Исследования, представленные в настоящей работе, были проведены при поддержке государственного контракта № 14.740.11.0134 в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

Таблица 1

## Химический состав сплава АК4-1

Cu	Mg	Fe	Ni	Si	Ti	Mn	Zr	примеси
1,9–2,7	1,2–1,8	0,8–1,4	0,8–1,4	0,35	0,02–0,1	0,2	0,3	0,1

Структурные исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе JEM-6390 и просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100, оснащенный приставкой для энергодисперсионного анализа. Тонкие фольги готовили на установке «Тепурол-5» методом струйной электролитической полировки.

Измерения микротвердости по методу Виккерса проводили на установке Микромет 5101 вдоль диаметра ИПДК образцов под нагрузкой 200 грамм, используя время выдержки 15 с. Для определения механических свойств были использованы цилиндрические образцы диаметром 5 мм и длиной базы 25 мм. Испытания на растяжение были проведены на испытательной машине типа Инстрон при комнатной температуре и скорости растяжения  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

Испытания на многоцикловую усталость (МнЦУ) проводили в соответствии с ГОСТ 25.502-79 [6] на испытательных машинах – высокочастотных пульсаторах Amsler 100 HFP 5100 и Amsler 300 HFP 5100 (Zwick/Roell) при осевом нагружении образца при температурах  $T = 20$  и  $175 \text{ }^\circ\text{C}$ . Форма цикла – синусоидальная. Коэффициент асимметрии цикла  $R_\sigma = 0,1$ . База испытаний  $N = 10^7$  циклов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что на фоне общей тенденции к снижению величины микротвердости с увеличением температуры РКУП существует несколько особенностей на диаграмме зависимости микротвердости от температуры РКУП (рис. 1).

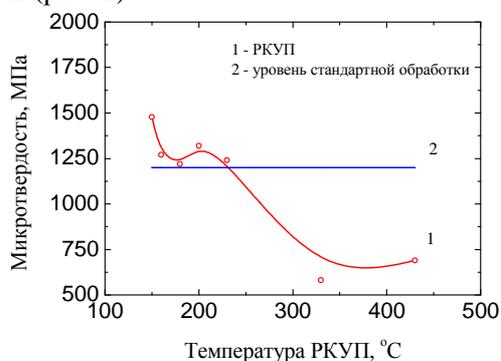


Рис. 1. Зависимость микротвердости от температуры РКУП: 1 – РКУП, 2 – уровень стандартной обработки

Во-первых, при обработке методом РКУП при температуре  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  наблюдаются максимальные значения микротвердости, но при этом образцы разрушались уже после трех проходов.

Во-вторых, характерным является пик вблизи температуры  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , который обусловлен, очевидно, тем, что эта температура рекомендуется для проведения старения в крупнозернистых образцах для выделения частиц упрочняющих фаз [5]. Возможное количество проходов РКУП увеличивается до 6.

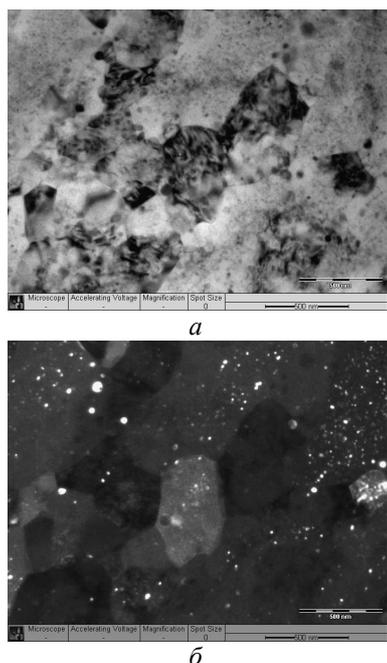
Третьей особенностью является небольшое повышение значений микротвердости после РКУП при температуре  $430 \text{ }^\circ\text{C}$ , которое вызвано близостью к температуре нагрева, используемого для закалки данного сплава. Вследствие этого в результате РКУП при температуре  $430 \text{ }^\circ\text{C}$  могло происходить дополнительное растворение легирующих элементов, ведущее к небольшому упрочнению материала.

Ниже приведены результаты изучения структуры и свойств сплава после РКУП при температуре  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ , поскольку именно в них ожидалась равноосная УМЗ структура с наименьшим размером зерна, ведущая к сочетанию повышенных значений предела прочности и предела выносливости. После РКУП при температуре  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ , 6 проходов, УМЗ образцы были деформированы протяжкой при этой же температуре для получения удлиненных заготовок диаметром 23 мм и длиной 43 мм (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид УМЗ образцов сплава АК4-1 после РКУП при температуре  $160 \text{ }^\circ\text{C}$  и дополнительной протяжке

Средний размер зерен в УМЗ образцах составил примерно 300 нм (рис. 3). При этом в структуре наблюдалось большое количество дисперсных частиц выделений, которые являются эффективными препятствиями движению дислокаций (рис. 4) и, как следствие, снижают уровень накопленной пластической деформации.

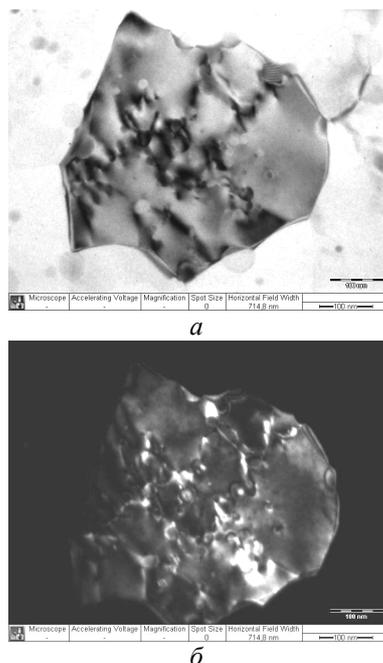


**Рис. 3.** Типичные микрофотографии структуры сплава АК4-1 подвергнутого РКУП при 160°C и дополнительной протяжке: *а* – светлопольное изображение; *б* – темнопольное изображение

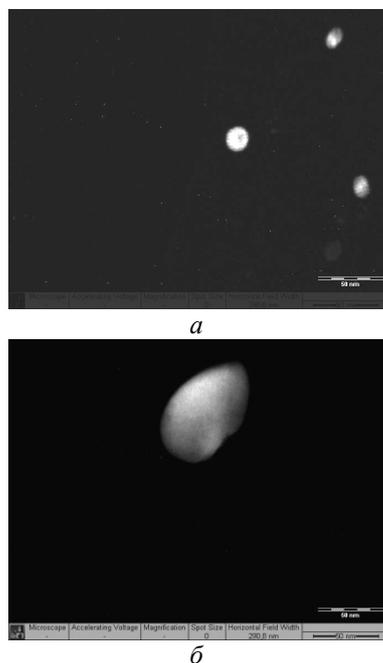
Второй тип частиц со средним размером примерно 70 нм (рис. 5, *б*) имел слегка вытянутую форму и содержал в основном алюминий, магний и медь. По элементному составу и морфологическим признакам их можно отнести к частицам фазы  $Al_2MgCu$ , которые также часто встречаются в сплаве АК4-1 (рис. 7) [5].

В частности, в структуре УМЗ образцов были выявлены два типа частиц. Первый тип имел глобулярную форму и средний размер примерно 20 нм (рис. 5, *а*). По данным энергодисперсионного анализа, эти частицы содержали в основном алюминий и медь (рис. 6), то есть относились к частицам фазы  $Al_2Cu$ , которые являются упрочняющими для данной системы сплавов.

В результате испытаний при комнатной температуре УМЗ сплав АК4-1, полученный методом РКУП при 160 °С и последующей протяжке, продемонстрировал повышенный предел прочности 460 МПа с относительным удлинением до разрушения до 7% (рис. 8). То есть сплав АК4-1 в состоянии с УМЗ структурой проявил предел прочности более чем на 20% выше, чем в крупнозернистом образце, подвергнутом стандартной обработке (370 МПа) (рис. 8), но при этом пластичность сплава снизилась более чем в два раза.



**Рис. 4.** ПЭМ изображение структуры УМЗ образцов сплава АК4-1 содержащее изображение дислокаций внутри зерен: *а* – светлопольное изображение; *б* – темнопольное изображение



**Рис. 5.** Темнопольное изображение частиц, с которых был сделан энергодисперсионный анализ, представленный на рис. 6 и 7

Повышенная прочность УМЗ образцов при комнатной температуре является, очевидно, результатом сильного измельчения зеренной структуры и дисперсионного упрочнения, тогда

как уменьшение относительного удлинения до разрушения можно объяснить наличием внутренних напряжений вокруг частиц и вблизи границ зерен препятствующих развитию зарождению и движению дислокаций.

В УМЗ образцах наблюдалась также малая протяженность стадии деформационного упрочнения. Как известно, на стадии деформационного упрочнения происходит увеличение плотности дислокаций. В УМЗ материале расстояние между границами зерен значительно меньше, поэтому дислокации быстрее достигают противоположной границы зерна и аннигилируют. Этим можно объяснить небольшую стадию деформационного упрочнения в УМЗ образцах и, соответственно, малую величину однородной деформации.

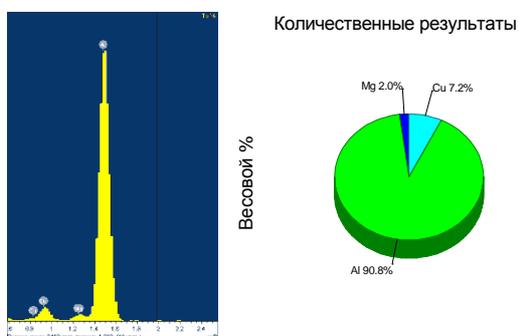


Рис. 6. Результаты энергодисперсионного анализа частиц, представленных на рис. 4, а

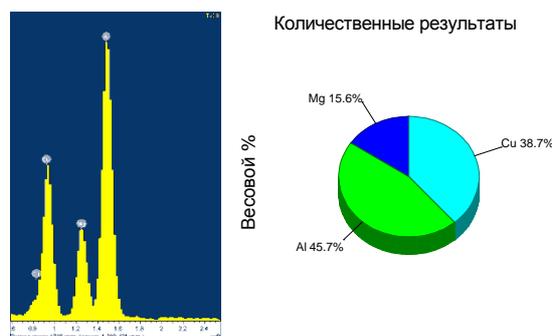


Рис. 7. Результаты энергодисперсионного анализа частиц, представленных на рис. 4, б

Механические испытания на растяжение УМЗ образцов АК4-1 при повышенной температуре показали, что значение предела прочности снижается незначительно до величины 430 МПа. Это подтверждает повышенную термическую стабильность механических свойств сплава АК4-1 в УМЗ состоянии вплоть до температуры 175 °С (рис. 9).

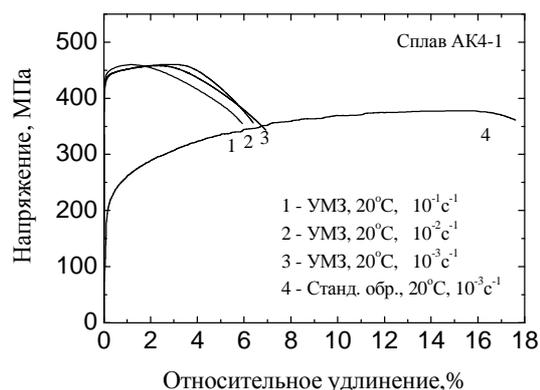


Рис. 8. Диаграммы «напряжение – относительное удлинение» после испытаний при комнатной температуре УМЗ образцов сплава АК4-1

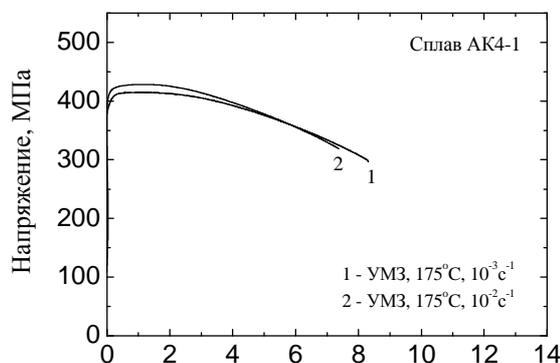


Рис. 9. Диаграммы «напряжение-относительное удлинение» после испытаний при температуре 175 °С УМЗ образцов сплава АК4-1

Экспериментальные данные, полученные при изучении МнЦУ, были использованы для определения численных значений коэффициентов степенной модели, которая описывает зависимость числа циклов до разрушения от напряжения:

$$N = C \cdot \sigma^{-n} \quad (1)$$

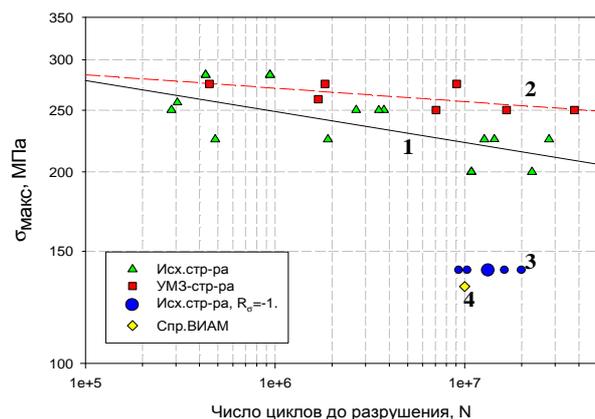
Для определения численных значений методом наименьших квадратов была использована программа Sigma Plot в ОС Windows.

Экспериментальные данные по МнЦУ и результаты их обработки при температурах 20 и 175 °С, приведены в обобщенных диаграммах (рис. 10–11), которые представляют собой линии регрессии построенные по степенной модели (1).

Как следует из приведенных выше данных (рис. 10), сплав АК4-1 в состоянии с УМЗ

структурой при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  имеет более высокий предел выносливости (на ~15%) на базе  $N = 10^7$  циклов в сравнении со сплавом с исходной структурой.

Вместе с тем при повышении температуры испытаний до  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$  на базе  $N = 10^7$  циклов в сплаве АК4-1 с УМЗ структурой происходит снижение предела выносливости с  $\sigma_{\max} = 257\text{ МПа}$  до  $\sigma_{\max} = 204\text{ МПа}$  (рис. 11).



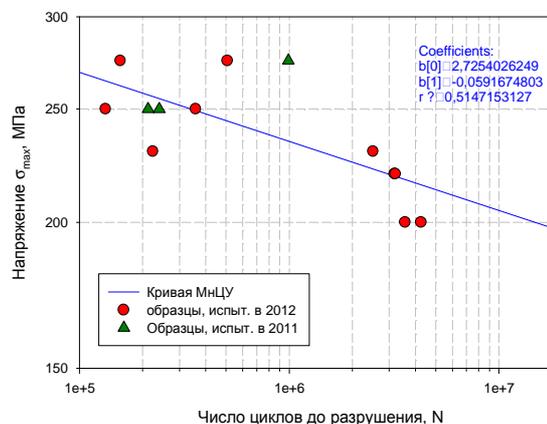
**Рис. 10.** Сплав АК4-1 с исходной структурой и УМЗ-структурой. МнЦУ;  $R_{\sigma} = 0,1$ . Зависимость числа циклов до разрушения от максимального напряжения в цикле:  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Кривая 1 – исходная структура; кривая 2 – УМЗ-структура; 3 – экспериментальные данные по образцам с исходной структурой, испытанных при симметричном цикле ( $R_{\sigma} = -1$ ); 4 – справочные данные ВИАМ при консольном изгибе с вращением (симметричный цикл)

Известно, что измельчение зеренной структуры способно повысить усталостные свойства в некоторых металлах и сплавах с УМЗ структурой [7–9].

В то же время в ряде публикаций отмечалось, что величина предела МнЦУ в алюминиевых сплавах, подвергнутых РКУП, близка к значениям, наблюдающимся в крупнозернистых материалах [10, 11], тогда как в работах других авторов [12] были экспериментально установлены более высокие усталостные свойства в УМЗ образцах.

Очевидно, что усталостные свойства алюминиевых сплавов чувствительны не только к измельчению зеренной структуры, но также, и к другим особенностям структуры, в частности к химическому составу, определяющему вклады твердорастворного и дисперсионного упрочнения. В частности, наличие атомов леги-

рующих элементов и дисперсных частиц способно препятствовать миграции границ зерен как одному из механизмов релаксации структуры в процессе усталостных испытаний, проявляющегося в виде роста зерен [8] и двойникования [9], и ведущего к разупрочнению материала.



**Рис. 11.** Сплав АК4-1 (УМЗ-структура). МнЦУ.  $T_{\text{исп.}} = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ .  $R_{\sigma} = 0,1$ . Зависимость числа циклов до разрушения  $N$  от максимального напряжения в цикле  $\sigma_{\max}$ . Кривая МнЦУ – результаты обработки экспериментальных данных по степенной модели (1)

Поэтому повышенные усталостные свойства при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  в РКУП образцах алюминиевого сплава АК4-1 по сравнению со свойствами крупнозернистых образцов, подвергнутых стандартной обработке, обусловлены, очевидно, сочетанием УМЗ структуры и дисперсионного упрочнения вследствие наличия частиц с размером зерен  $20\text{ нм}$  (рис. 5, а). В процессе усталостных испытаний при повышенной температуре  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$  происходит укрупнение этих частиц, в результате которого наблюдалось небольшое снижение предела выносливости.

## ВЫВОДЫ

1. Снижение температуры РКУП до  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  позволило сформировать УМЗ структуру со средним размером зерен  $300\text{ нм}$ , содержащую частицы упрочняющей фазы  $\text{Al}_2\text{Cu}$  с меньшим средним размером  $20\text{ нм}$ , что способствовало повышению предела прочности до  $460\text{ МПа}$  при пластичности  $7\%$ . Высокие значения предела прочности проявили лишь небольшое снижение до  $430\text{ МПа}$  после механических испытаний на растяжение при повышенной температуре  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

2. Формирование УМЗ структуры в сплаве АК4-1 привело к повышению предела выносливости при температуре 20 °С на 15% до  $\sigma_{\max} = 257$  МПа, по сравнению с пределом выносливости  $\sigma_{\max} = 222$  МПа для крупнозернистых образцов, подвергнутых стандартной обработке. С повышением температуры испытаний до 175 °С предел выносливости в УМЗ состоянии снизился до  $\sigma_{\max} = 204$  МПа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Валиев Р. З., Александров И. В.** Объемные наноструктурные металлические материалы. М: ИКЦ «Академкнига». 2007. 398 с.
2. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation / R. Z. Valiev [et al.] // JOM. 2006. V. 58(4). P. 33–39.
3. **Zehetbauer M. J., Zhu Y. T.** Bulk nanostructured materials, 2009. 736 p.
4. **Valiev R. Z., Islamgaliev R. K., Alexandrov I. V.** Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // Prog. Mat. Sci. 2000. V. 45. P. 103–189.
5. Промышленные алюминиевые сплавы. Справочник. М.: Металлургия, 1984. 528 с.
6. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.
7. **Lukas P., Kunz L., Svoboda M.** Fatigue notch sensitivity of ultrafine-grained copper // Mater. Sci. Eng. A. 2005. V. 391. P. 337–341.
8. Microstructural study of the parameters governing coarsening and cyclic softening in fatigued ultrafine-grained copper / H. W. Höppel [et al.] // Phil. Mag. A. 2002. V. 82. P. 1781.

9. Microstructure and fatigue properties of the ultrafine-grained AM60 magnesium alloy processed by ECAP / O. Kulyasova [et al.] // Mat. Sci. Eng. A. 2009. V. 503. P. 176–180.

10. **Терентьев В. Ф.** Усталость металлических материалов. М.: Наука. 2002. 248 с.

11. Fatigue behavior of ultrafine-grained metals and alloys / H. W. Höppel [et al.] // International Journal of Fatigue. 2006. V. 28. P. 1001–1010.

12. **Estrin Y., Vinogradov A.** Fatigue behaviour of light alloys with ultrafine grain structure produced by severe plastic deformation: An overview // International Journal of Fatigue. 2010. V. 32. P. 898–907.

#### ОБ АВТОРАХ

**Исламгалиев Ринат Кадыханович**, проф. каф. нанотехнологий, зам. дир. ИФПМ УГАТУ. Дипл. физик (БГУ, 1980). Д-р физ.-мат. наук (ИФМК УНЦ РАН, 1999). Иссл. в обл. структуры и свойств наноматериалов.

**Нестеров Константин Михайлович**, асп. каф. нанотехнологий УГАТУ. Дипл. магистра техники и технологий (УГАТУ, 2000). Готовит диссертацию в области прочности и электропроводности медных сплавов.

**Хафизова Эльвира Динифовна**, дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. области прочности и усталости алюминиевых сплавов.

**Ганеев Артур Вильевич**, асп. НИИФПМ УГАТУ. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 2005). Готовит диссертацию в области структуры и свойств наноструктурных сталей.