

А. А. Гирфанова, Я. И. Наседкина, Р. Р. Гринь,
В. В. Астанин, И. В. Александров, Ф. Ф. Мусин

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ СО СВАРНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ, ПОЛУЧЕННЫМ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ

В работе представлены результат практических исследований применения оптико-акустического метода для изучения процессов деформации и разрушения образцов, полученных линейной сваркой трением. При применении данного метода было показано, что при одноосном испытании сварных соединений образцов ВТ6 и ВТ8-1М образование деформационных полос сдвига происходит под углом 45° . Из-за искажения напряженного состояния сварным соединением разрушение образца происходит в околошовной зоне, а термическая обработка материала устраняет это влияние. Данные о сигналах акустической эмиссии, полученные во время испытаний, позволяют определять появление первичных микротрещин и могут предсказать момент разрушение образца. *Линейная сварка трением; сварной шов; ВТ6; ВТ8-1М; VIC-3D; акустическая эмиссия; деформация*

ВВЕДЕНИЕ

Возможность прогнозирования и повышения прочности ответственных элементов конструкций самолетов, таких как полые лопатки или диски (турбинных колес), связаны с исследованиями распределение полей деформации и напряженно-деформированного состояния элементов конструкций [1]. Данные исследования могут быть проведены с помощью объединения математического моделирования и эксперимента. Одним из экспериментальных методов является проведение механических испытаний с синхронной записью полей деформации с помощью оптической системы VIC-3D и сигналов акустической эмиссии (АЭ). Предлагаемый комбинированный метод может быть эффективно использован для исследования изменений деформаций и ее локализации, а также осуществлять контроль качества инновационных про-

дуктов, таких как разработка двигателей самолетов нового поколения.

В данной статье представлены результаты применения разработанного, комбинированного метода изучения процессов деформации и разрушения в образцах, полученных линейной сваркой трением.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сварные образцы были изготовлены линейной сваркой трением (ЛСТ) [2] из титановых сплавов ВТ6 и ВТ8-1М. Пример микроструктуры показан на рисунке 1. Для проведения исследований на растяжение использовались: 1) плоские образцы сечением $15 \times 0,8 \text{ мм}^2$ (рис. 2, а); 2) плоские образцы сечением $12 \times 0,8 \text{ мм}^2$ с односторонним концентратором нанесенным на зону сварки (рис. 2, б), глубиной 3 мм. Плоскость сварки находилась перпендикулярно оси приложения нагрузки. Испытания образцов проводились на электромеханической машине INSTRON 5982 по методике испытаний на одноосное растяжение со скоростью нагружения 1 мм/мин. Регистрация сигналов АЭ проводилась на лабораторном программно-аппаратном комплексе МАЛАХИТ АС-12А. Исследование полей перемещений и деформаций при одноосном растяжении пластин проводилось с использованием цифровой оптической системы Vic-3D.

Контактная информация: 8-919-614-73-18

Работа выполнена в рамках проекта «Создание технологий и промышленного производства узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений» (шифр 2010-218-01-133) в рамках реализации Постановления № 218 Правительства РФ от 9.04.2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства». Экспериментальные результаты были получены с использованием оборудования НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии» ФГБОУ ВПО УГАТУ.



Рис. 1. Микроструктура сварного соединения сплавов VT8-1М (слева) и VT6 (справа) в исходном состоянии

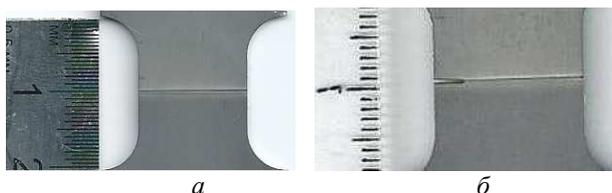


Рис. 2. Образец для испытания на растяжение из сваренных титановых сплавов

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Испытания плоских образцов без концентратора напряжений

На рис. 3 приведены синхронизированные диаграммы растяжения и сигналов АЭ. На начальном этапе увеличения нагрузки (от 0 до 100 с), наблюдаются нарастающие по амплитуде сигналы АЭ, характерные для контакта образца с захватами. Далее интенсивность этих сигналов снижается, а при переходе к стадии пластической деформации наблюдается новая активность, связанная с образованием микротрещин.

Переход от упругой к пластической деформации соответствует времени $t_1 = 140$ с. Упругая деформация постепенно локализуется у галтелей образца (рис. 4, а), где возникают поверхностные микротрещины, вызывающие сигналы АЭ с амплитудой до 70 дБ.

На стадии пластической деформации на временном участке от 145 до 160 с, в образце формируется сдвиговая деформационная полоса под углом около 45° к оси растяжения, пересекающая зону сварного соединения (рис. 4, б). На рис. 4, в можно видеть, что в зоне сварного соединения происходит локализация деформации, так как структура и металлографическая текстура соединения и прилегающей зоны отличаются от характеристик основного металла. При этом активность акустических сигналов снижается, что связано с прекращением образования поверхностных микротрещин в результате релаксации напряжений на других участках образца.

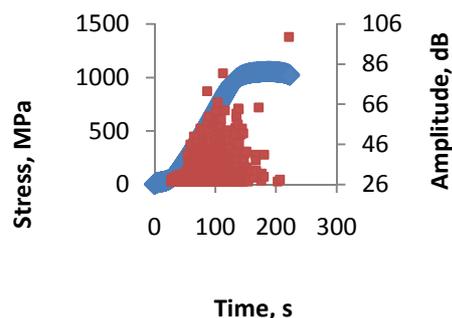


Рис. 3. Совмещенные по времени диаграммы растяжения и сигналов АЭ

После достижения $t_4 = 175$ с, что соответствует степени деформации $\varepsilon = 7,8\%$ (рис. 4, г) поле деформации заметно усложняется: появляется вторая деформационная полоса, которая образует деформационный крест. Пересечение двух полос существенно усложняет схему напряженного состояния, что приводит к зарождению микротрещин в центральной части образца. Появление микротрещин регистрируется сигналами АЭ. Микротрещины соединяются и образуют магистральную трещину, которая распространяется от центра к краям образца (рис. 4, д–е).

Описанная последовательность событий подтверждается фрактографическими исследованиями. В средней части образца (рис. 5, а) видны следы отрыва – результат образования первых микротрещин. Другие участки образца разрушались сколом (рис. 5, б), характерным для монотонного развития трещины. Поверхность излома имеет достаточно гладкие края. Структура образца по краям отличается от середины. Трещина зародилась в околошовной зоне под влиянием напряженного состояния, искаженного сварным соединением.

Испытания плоских образцов с концентратором напряжений

Ниже представлены результаты исследований механизмов деформации и разрушения образцов со сварным соединением с искусственным концентратором напряжений, нанесенным на сварной шов. На рисунке 6 приведена совмещенная по времени диаграмма растяжения и сигналов АЭ. Совмещенная диаграмма принципиально отличается от предыдущей. Разрушение образца началось в упругой области при напряжении 1044 МПа.

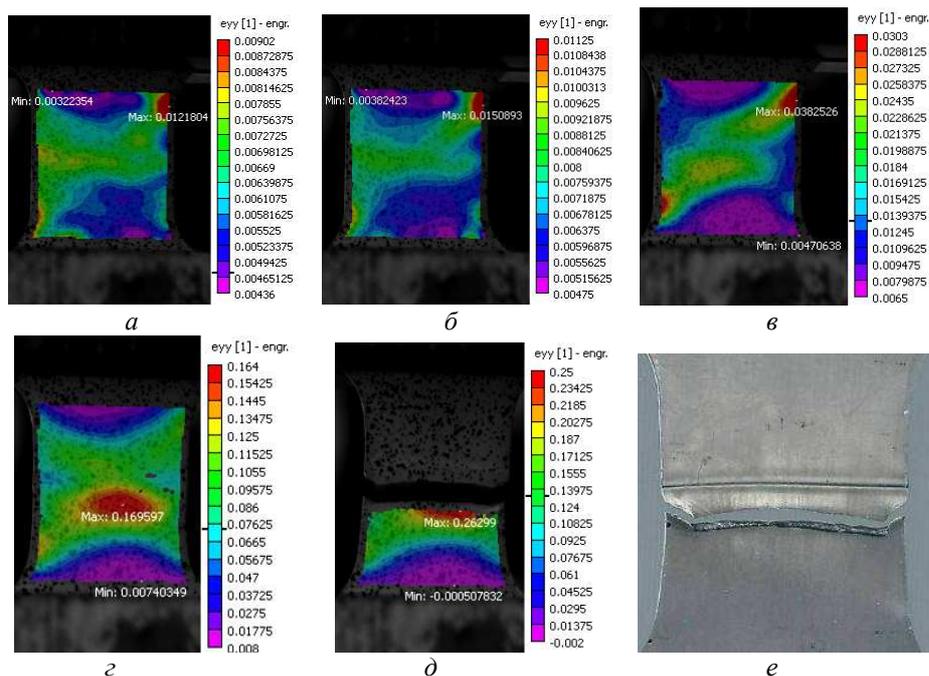


Рис. 4. Карты полей деформации в моменты времени, указанные под рисунками: $a - t_1 = 140\text{s}$; $b - t_2 = 150\text{s}$; $c - t_3 = 165\text{s}$; $d - t_4 = 175\text{s}$; $e -$ разрушенный образец

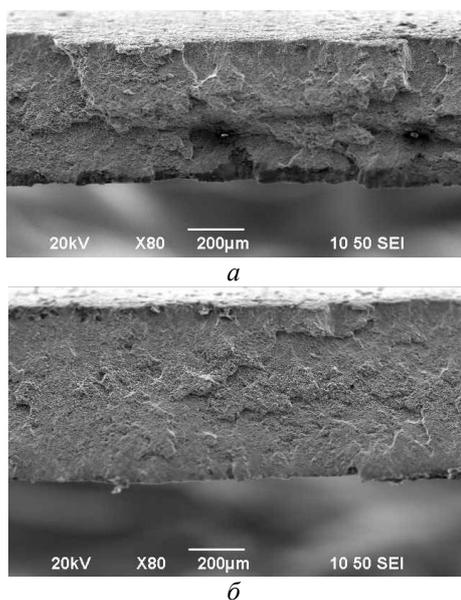


Рис. 5. Структура поверхности излома в центральной (а) и периферийной (б) части образца

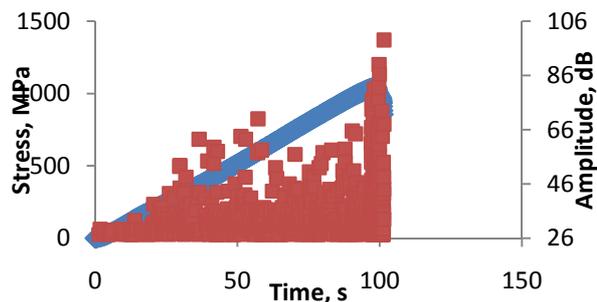


Рис. 6. Совмещенные по времени диаграммы растяжения и сигналов АЭ

При изучении карт деформации видно, что упругая деформация постепенно локализуется у концентратора напряжений (рис. 7, а), деформационное поле приобретает сдвиговые компоненты и переходит в пластическую под углом 45° (рис. 7, б).

С 75 по 85 с в образце происходит образование микротрещин, о чем свидетельствуют сигналы акустической эмиссии (АЭ) (рис. 6), их значение не превышает 66 дБ [3].

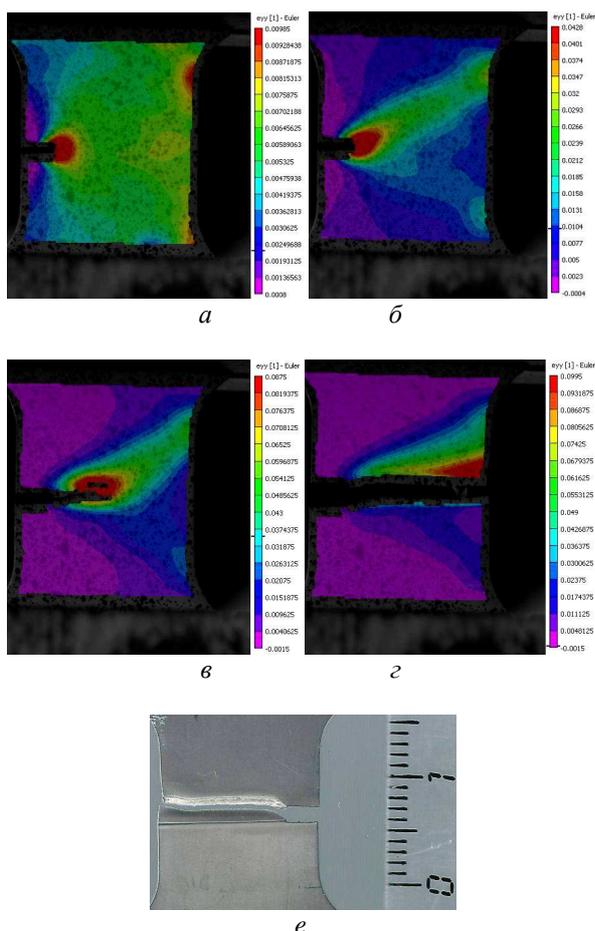


Рис. 7. Карты полей деформации в моменты времени указанные под рисунками:
a – $t_1=75s$; *б* – $t_2=85s$; *в* – $t_3=95s$;
г – $t_4=100s$; *е* – разрушенный образец

Трещина начинает распространяться уже при относительной степени деформации $\epsilon = 2\%$ образца, (рис. 7, *в*), и сигналы АЭ на короткий промежуток времени ослабевают. С последующим увеличением нагрузки происходит разрушение срезом под 45° (рис. 7, *г*).

Ускоренное разрушение сопровождается повышенной плотностью сигналов АЭ. На стадии разрушения наблюдается максимальный пик амплитуды и энергии, достигающий $170 \text{ В}\cdot\text{мкс}$.

Первичное зарождение трещины в зоне концентратора напряжений возникают вследствие электроискрового наклепа (рис. 8, *а*). Несмотря на концентратор, распространение трещины идет не по плоскости соединения, а по околошовной зоне, образуя срез под углом 45° , по сечению меньшей толщины образца (рис. 8, *б*). Долгом образца представлен на рис. 8, *в*. Здесь наблюдаются вторичные трещины.

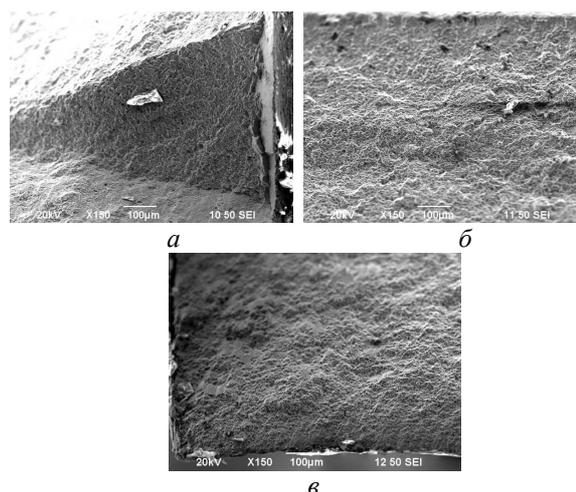


Рис. 8. Структура поверхности излома образца

ИСПЫТАНИЯ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Для уменьшения остаточных напряжений, образующихся в титановых сплавах при линейной сварке трением, был применен неполный отжиг при сравнительно низкой температуре 500°C в течение 1 ч, недостаточных для развития полигонизации и рекристаллизации: стабилизация при этих температурах осуществляется, по-видимому, в результате дислокационной ползучести [4]. Микроструктура после термообработки приведена на рис. 9.

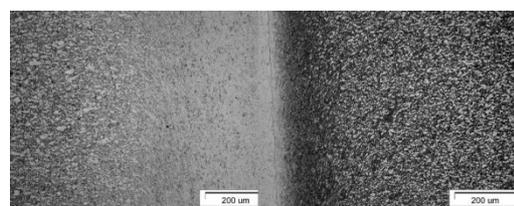


Рис. 9. Структура сварного соединения сплавов ВТ8–1М (слева) и ВТ6 (справа) после ТО

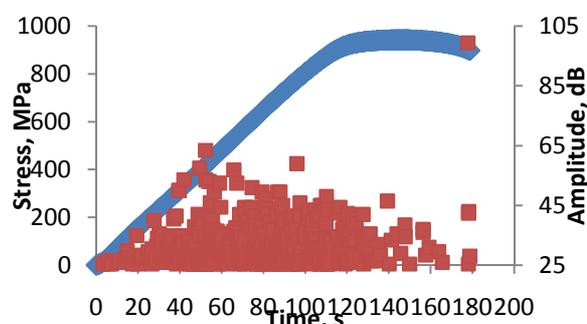


Рис. 10. Совмещенные по времени диаграммы растяжения и сигналов АЭ

На совмещенной диаграмме, при $t = 100s$, появляется достаточно высокий сигнал амплитуды равный 60 дБ, характерный для образования поверхностных микротрещин (рис. 10).

При изучении карт деформации видно, что деформационное поле (более однородное) приобретает сдвиговые компоненты (при напряжении 800 МПа) и переходит в пластическую под углом 45° (рис. 11, б). Когда в образце относительное удлинение достигает $\varepsilon = 7,25\%$ (с 120 по 150 секунды), значения амплитуды акустических сигналов становятся меньше, чем в предыдущих случаях, что свидетельствует о том, что в образце образуются микротрещины в меньшем масштабе.

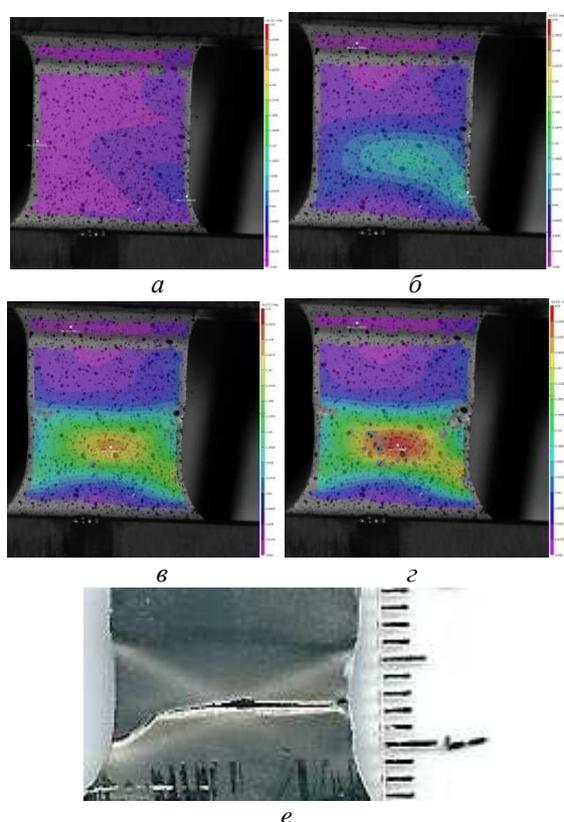


Рис. 11. Карты полей деформации в моменты времени указанные под рисунками: $a - t_2 = 100s$; $b - t_2 = 140s$; $c - t_3 = 170s$; $d - t_4 = 176s$; $e -$ разрушенный образец

При изучении карт деформации видно, что происходит формирование сдвиговой деформационной полосы (рис. 11, в). В центральной области шейки, в области пересечения деформационных полос, создается концентрация напряжений, достаточная для образования микротрещин [5]. Положение полос локализации деформации в момент их пересечения определило точку разрыва образца (рис. 11, д). Наибольшая

деформация локализуется в области сплава ВТ8-1М, а не в околошовной зоне, как это было до проведения термообработки.

При исследовании фрактографии, в средней части образца (рис. 12, а), видны следы отрыва – результат образования первых микротрещин. Вследствие возникновения жесткого напряженного состояния, распространение трещины сопровождалось пластической деформацией, образуя участки скола (рис. 12, б).

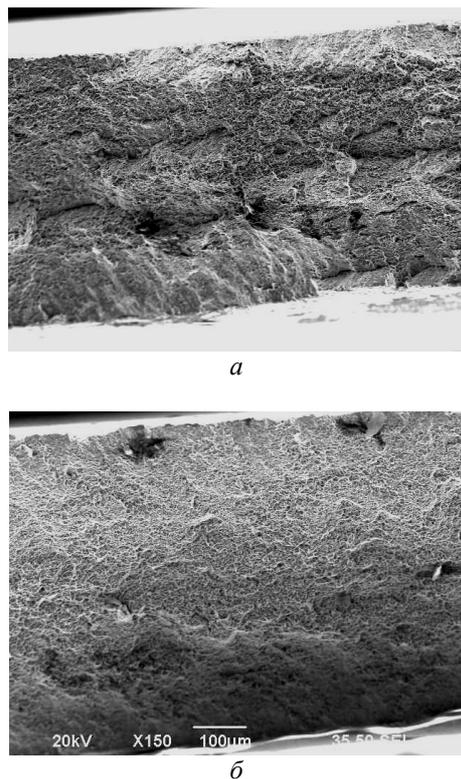


Рис. 12. Структура поверхности излома в центральной (а) и периферийной (б) части образца

Таким образом, в термообработанном сварном образце ВТ6-ВТ8-1М макротрещина зарождается в сплаве ВТ8-1М, где происходит наиболее интенсивная пластическая деформация сдвига.

ВЫВОДЫ

1. Совмещение диаграмм растяжения, полей деформации и акустической эмиссии позволяет детально изучить деформационное поведение и разрушение комбинированных образцов. Метод позволяет определять характер локализации деформации, момент образования первых микротрещин и особенности разрушения. Так было установлено, что сварное соединение ВТ6-ВТ8-1М, существенно усложняет схему

напряжено-деформированного состояния, что приводит к разрушению образца в околошовной зоне.

2. Околошовная зона весьма чувствительна к концентратору напряжения, зарождение первых микротрещин происходит на ранней стадии, наблюдается ускоренное разрушение вблизи сварного шва, сопровождающееся резкой локализацией деформации.

3. Термическая обработка устраняет влияние сварного шва на развитие деформации в образце и, в отличие от предыдущих случаев, разрушение происходит не в околошовной зоне, а по основному материалу ВТ8–1М.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Морозов Г. А., Степанов А. В.** Современные методы неразрушающего контроля жаропрочных сплавов и изделий из них // Научные идеи С. Т. Кишкина и современное материаловедение: тр. международн. науч.-техн. конф. М.: ВИАМ, 2006. 378 с.

2. Влияние величины осадки на формирование сварного соединения при линейной сварке трением / М. В. Караваева [и др.] // Письма о материалах. 2012. Т. 2. С. 40–44.

3. **Ермолов И. Н., Алешин Н. П., Потапов А. И.** Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические Н44 методы контроля: практ. пособие. М.: Высш. шк., 1991. 283 с.

4. **Колачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А.** Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учеб. для вузов. М.: Изд-во МИСИС, 1999. 416 с.

5. Динамика деформационных полос и разрушение алюминий-магниевого сплава АМгб / А. А. Шибков [и др.] // Физика твердого тела. 2011. Т. 53, вып. 10. С. 1873–1878.

ОБ АВТОРАХ

Гирфанова Айгуль Айдаровна, инженер Науч.-образовательн. центра «Наноструктурные материалы и высокие технологии». Дипл. магистр техники и технологии по материаловедению и технологии новых материалов (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. неразрушающего контроля.

Наседкина Яна Игоревна, асп. Руанск. ун-та. Дипл. инженер по нанотехнологиям (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. неразрушающего контроля.

Гринь Регина Равиловна, инженер каф. материаловедения и физики металлов. Дипл. магистр техники и технологии (УрФУ, 2012). Иссл. в обл. линейной сварки трением.

Астанин Владимир Васильевич, проф. той же каф. Дипл. инженер по машинам и технологии обработки металлов давлением (УАИ, 1973). Д-р физ.-мат. наук (Московск. ин-т сталей и сплавов, 1996). Иссл. в обл. пластической и сверхпластической деформации.

Александров Игорь Васильевич, проф., гл. науч. сотр., зав. каф. физики УГАТУ. Дипл. физик (БГУ, 1976). Д-р физ.-мат. наук по физике твердого тела (ИФМ УрНЦ РАН, 1997). Иссл. в обл. физики прочности и пластичности материалов.

Мусин Фаниль Фанусович, доц. каф. материаловедения и физики металлов, техн. директор НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии». Дипл. специалист по машинам и технологиям обработки металлов давлением (УГАТУ, 1988), Канд. физ.-мат. наук (ИПСМ РАН, 1994). Иссл. в обл. материаловедения алюминиевых, титановых сплавов и сталей.