

верхнем пределе его распределения и повышения конкурентоспособности металлопродукции.

#### Список литературы

1. Штремель М.А. "Научные школы Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета). 75 лет. Становление и развитие" - М.: МИСиС. - 1997. - С. 392.
2. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Салихов Т.Ш., Пономарёва М.В., Скородумов С.В., Глухов М.Г. // Изв. вузов. Черн. мет. - 2008. - № 11. - С. 30.
3. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Сухова В.Г., Марков Е.А., Арсенкин А.М., Салихов Т.Ш. // МИТОМ. - 2009. - № 5. - С. 60-67
4. Арабей А.Б., Пышминцев И.Ю., Штремель М.А. и др. // Изв. вузов. Черн. мет. - 2009. - № 9. - С.3.
5. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч.2. Деформация. - М.: МИСиС, 1997, 528с.

### РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НЕОДНОРОДНОСТИ ВЯЗКОСТИ В СТАЛЯХ С РАЗНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ

Кудря А. В., Соколовская Э. А., Кузько Е. И., Скородумов С. В.,  
Траченко В. А., Папина К. Б., Ле Хай Нинь

НИТУ «МИСиС», Москва, РФ  
[AVKudrya@misis.ru](mailto:AVKudrya@misis.ru)

Решение обратных задач в металловедении предполагает, что на основе сопоставления строения изломов, структур и свойств для групп сплавов или их состояний выявляются закономерности влияния параметров структуры на эти свойства [1]. Это важно для выработки объективных требований к неоднородности структур, гарантирующих заданный уровень качества сплавов. В этой связи перспективно развитие компьютеризированных процедур измерения неоднородности структур и разрушения, что позволит сформулировать содержательные гипотезы о связи свойств со структурой, обосновать числовые показатели структуры.

Накопленный опыт работы в данном направлении [2] подтвердил эффективность использования компьютеризированных процедур при сопоставлении конфигурации разномасштабных типичных структур (рисунки дендритов, серный отпечаток и микроструктура различной морфологии) и изломов конструкционных сталей. Для повышения объективности оценок были обоснованы процедуры выбора уровня бинаризации и минимально допустимой площади поля наблюдения, апробированы алгоритмы «выравнивания» интенсивности яркости в пределах кадра (и панорам, полученной их «сшивкой»).

Использование развитых процедур цифровой дилатации изображений, например, серного отпечатка по Бауману для реконструкции его первичной геометрии (в связи с повреждаемостью включений при изготовлении шлифа) позволили оценить особенности иерархической организации изображений и их связь со строением излома. Для оценки неоднородности размещения случайных элементов изображения на плоскости оценены возможности построения полиэдров Вороного.

Развитие методик измерения 2D- и 3D-изображений изломов предусматривало синтез 3D-картины из нескольких 2D-кадров (стереофотограмметрия); косвенный анализ 3D-особенностей по «плоским» снимкам (2D-кадрам) и фрактальной размерности (по измерению траектории рельефа).

Практика их применения при анализе строения поверхности разрушения сталей 16Г2АФ, 15Х2МФА, 40Х2Н2МА, 38ХНЗМФА-Ш, трубных сталей различных классов прочности позволила предложить алгоритмы выделения элементарных «площадок» разрушения (ямки и фасеток) для семантического анализа изображений, определить границы применимости различных подходов к ранжировке изломов и выявить возможные источники ошибок. Массовые измерения топографии изломов с вариацией шага измерения не менее двух порядков (от микро- до мезомасштабов наблюдения) - установить ограничения в использовании фрактальной размерности для определения различий в морфологии изломов (механизмов разрушения) [3]. Синтез 3D-картины из нескольких 2D-кадров позволил оценить соотношение двух типов ямок в изломе (равноосные и параболические) и обнаружить отклонение от закона геометрического подобия, наблюдаемое при увеличении размеров ямок.

Прямые систематические измерения хрупких изломов сталей 15Х2МФА, 40Х2Н2МА, 38ХНЗМФА-Ш, 10Г2ФБУ и 16Г2АФ показали, что сопутствующее десятикратному увеличению размеров зерна аустенита незначительное увеличение крупных фасеток транскристаллитного разрушения (в 3-5 раз) может внести существенное искажение в соотношение микро- и мезомасштабов разрушения, что не всегда учитывается в исследовательской практике.

Развитие компьютеризированных процедур измерения разнообразных структур и изломов предусматривало оценку возможности их метрологического обеспечения для получения воспроизводимых и сопоставимых результатов. Так, в частности, установлены границы эффективного и надежного применения процедур традиционной и непараметрической статистики, для оценки воспроизводимости полученных результатов [4]. Сформулированы требования к минимальному и максимальному объемам массивов данных измерения, обеспечивающему представительность оценок, при описании морфологии строения структур, мезо- и микрорельефа изломов.

Предложенные в рамках работы методические подходы к измерению структур и изломов были использованы при выработке рекомендаций по необходимости регламентации допустимого масштаба неоднородности структур корпусных сталей в атомной энергетике [5,6], в т.ч. при назначении режимов восстанавливающих отжигов и при уточнении процедур аттестации качества стали (по загрязненности неметаллическими включениями, неоднородности геометрии строения макро- и микроструктур).

Для объективного сопоставления хладноломкости сталей широкого класса апробирован принцип максимума правдоподобия при обработке серийных кривых ударной вязкости, дополненный измерением геометрии изломов в интервале температур испытания от плюс 20 до минус 196 °С.

На основе сопоставления строения структур и изломов широкого класса сталей показана определяющая роль совместного влияния разномасштабных структур на развитие разрушения от микротрещин к магистральной трещине, что является существенным для выяснения причин разброса пластичности и вязкости конструкционных материалов в рамках действующих технологий. Это принципиально важно для повышения однородности качества и конкурентоспособности металлопродукции.

Предполагается также, что разработанные подходы для количественного анализа структур и изломов могут явиться основой (после накопления представительной экспериментальной базы результатов измерения их геометрии) для разработки принципиально новой линейки нормативных документов, обеспечивающей контроль качества материалов по виду структуры и излома.

#### Список литературы

- 1 Штремель М.А. // МитОМ. – 2005. - № 5. – С. 35.
- 2 Кудря А.В., Соколовская Э.А., Сухова В.Г., Марков Е.А., Арсенкин А.М., Салихов Т.И. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. № 5. С. 60-67

3. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Арсенкин А.М. // Деформация и разрушение материалов. - 2010. № 1. - С. 38.
4. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Сухова В.Г., Скородумов С.В. // Изв. Вузов. Черн. Мет.–2010.– № 11. С. 35.
5. Кудря А.В., Никулин С.А., Николаев Ю.А., Арсенкин А.М., Соколовская Э.А., Скородумов С.В., Чернобаева А.А., Кузько Е.И., Хорева Е.Г. // Изв. Вузов. Черн. Мет.–2009.–№ 9.–С. 23.
6. Никулин С.А., Кудря А.В., Соколовская Э.А., Скородумов С.В., Ли Э.В., Кузько Е.И., Салихов Т.Ш., Арсенкин А.М. // Металлург.–2011.–№ 10.–С.72.

## ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК МНОГОКОМПОНЕНТНОГО АМОРФНО-НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА

Ушаков И.В., Сафронов И.С., Людчик О.Р. \*\*

*Московский государственный горный университет, г. Москва, РФ,*  
[ushakoviv@mail.ru](mailto:ushakoviv@mail.ru)

*Тамбовский государственный университет им. Г.П. Державина, г. Тамбов, РФ*  
[safronovfamili@rambler.ru](mailto:safronovfamili@rambler.ru)

\*\* *Белорусский государственный университет, г. Минск.*  
[lvudchik@tut.by](mailto:lvudchik@tut.by)

### Аннотация

Экспериментально исследован характер деформирования и разрушения тонких лент аморфно-нанокристаллического металлического сплава подвергнутого обработке импульсным лазерным излучением. Выявлена специфика развития разрушения инициированного локальным нагружением в области лазерной обработки и на ее границе. Показана возможность одновременного повышения пластичности и микротвердости на границе зоны лазерной обработки.

Аморфные и аморфно-нанокристаллические металлические сплавы являются перспективными материалами с уникальным набором физических и химических свойств. Получение таких материалов происходит в результате быстрой закалки из расплава и последующей обработки. Данные материалы могут обладать рядом полезных эксплуатационных характеристик, например: высокой магнитной проницаемостью, околонулевой магнитострикцией, высокой твердостью и пр. [1]. В то же время комплекс свойств аморфных и аморфно-нанокристаллических металлических сплавов не является оптимальным. В результате лазерной обработки удастся обеспечить оптимизацию механических характеристик аморфно-нанокристаллического металлического сплава [2]. Целью данной работы является изучение особенностей изменения механических свойств и закономерностей разрушения тонких лент аморфно-нанокристаллических металлических сплавов в результате импульсной лазерной обработки.

### Методика эксперимента

Исследования проводили на аморфном металлическом сплаве  $Co_{71,66}V_{4,73}Fe_{3,38}Cr_{3,14}Si_{17,09}$  (Ашинский металлургический завод). Для перевода материала в аморфно-нанокристаллическое состояние, образцы подвергали печному отжигу в температурном интервале 703-923 К.